

*CENTRO: ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION. SANTANDER*

TITULO: APORTACIONES PARA EL USO DE NANOFLUIDOS
EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CARCASA Y
TUBOS/ CONTRIBUTIONS TO THE USE OF NANOFLUIDS IN
A SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER

TRABAJO FIN DE MASTER (TFM)

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERIA QUIMICA
POR LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA Y LA UNIVERSIDAD DEL
PAÍS VASCO/EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA

Alumno Estela Abascal Carral

Fecha 22/02/2019

Firma

Director María José Rivero Martínez

Curso Académico 2018/2019

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA.....	7
2.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....	7
2.2 ESPECIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	8
2.3 ESPECIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	10
2.3.1 Determinación del coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa	11
2.3.2 Determinación del coeficiente de transferencia de calor en el lado de los tubos	12
2.3.3 Determinación del caudal volumétrico necesario en función del nanofluido utilizado.....	13
2.3.4 Determinación de la caída de presión en el intercambiador.....	14
3. RESULTADOS	17
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS NANOFLUIDOS	17
3.1.1 Nanofluidos convencionales	21
3.1.2 Nanofluidos híbridos	24
3.2 PARÁMETROS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	28
3.2.1 Coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa	29
3.2.2 Coeficiente de transferencia de calor en el lado de los tubos.....	29
3.2.3 Determinación del caudal volumétrico necesario en función del nanofluido utilizado.....	29
3.2.4 Determinación de la caída de presión en el intercambiador de calor.....	37
4. CONCLUSIONS	46
5. NOMENCLATURA.....	47
6. BIBLIOGRAFÍA	50
7. ANEXOS	57
7.1 ANEXO I.....	57
7.2 ANEXO II.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variables en la síntesis de nanofluidos (Sezer y col., 2018).....	2
Figura 2. Mecanismos de toxicidad en sistemas acuáticos y terrestres. a formación de ROS, b liberación de iones, c internalización, y d formación de capa superficial (Bundschuh y col., 2018).....	4
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso.	7
Figura 4. Medida de la conductividad térmica mediante el equipo KD2 Pro.	9
Figura 5. Factor de transferencia de calor en el lado de la carcasa. (Sinnott y col., 2005)	12
Figura 6. Factor de transferencia de calor para el lado de los tubos. (Sinnott y col., 2005).....	14
Figura 7. Factor de fricción para el lado de la carcasa (Sinnott y col., 2005).	15
Figura 8. Factor de fricción para el lado de los tubos (Sinnott y col., 2005).	16
Figura 9. Caudal volumétrico necesario en función del nanofluido convencional en base agua utilizado.....	32
Figura 10. Caudal volumétrico necesario en función del nanofluido convencional en base etilenglicol utilizado.	33
Figura 11. Caudal volumétrico necesario en función del nanofluido híbrido en base agua utilizado.	36
Figura 12. Caudal volumétrico necesario en función del nanofluido híbrido en base etilenglicol utilizado.	36
Figura 13. Caída de presión en el lado de los tubos con el uso de nanofluidos convencionales en base agua a diferentes concentraciones.	40
Figura 14. Caída de presión en el lado de los tubos con el uso de nanofluidos convencionales en base etilenglicol a diferentes concentraciones.	40
Figura 15. Caída de presión en el lado de los tubos con el uso de nanofluidos híbridos en base agua a diferentes concentraciones.	43
Figura 16. Caída de presión en el lado de los tubos con el uso de nanofluidos híbridos en base etilenglicol a diferentes concentraciones.	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones del intercambiador de calor utilizado.	8
Tabla 2. Condiciones de operación establecidas.	8
Tabla 3. Propiedades de los nanofluidos convencionales con agua como fluido base... ..	22
Tabla 4. Propiedades de los nanofluidos convencionales con etilenglicol como fluido base	23
Tabla 5. Propiedades de los composites.	24
Tabla 6. Propiedades de los nanofluidos híbridos con agua como fluido base.	26
Tabla 7. Propiedades de los nanofluidos híbridos con etilenglicol como fluido base....	27
Tabla 8. Cálculos intermedios para la obtención del coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa.	29
Tabla 9. Valores del número de Reynolds y flujo másico en función del nanofluido utilizado siendo estos convencionales y en base agua.....	30
Tabla 10. Valores del número de Reynolds y flujo másico en función del nanofluido utilizado siendo estos convencionales y en base etilenglicol.	31
Tabla 11. Valores del número de Reynolds y flujo másico en función del nanofluido utilizado siendo estos híbridos y en base agua.	34
Tabla 12. Valores del número de Reynolds y flujo másico en función del nanofluido utilizado siendo estos híbridos y en base etilenglicol.....	35
Tabla 13. Velocidades de los nanofluidos convencionales en base agua a través de los tubos.	38
Tabla 14. Velocidad de los nanofluidos en base etilenglicol a través de los tubos.	39
Tabla 15. Velocidad de los nanofluidos híbridos en base agua a través de los tubos. ...	41
Tabla 16. Velocidad de los nanofluidos híbridos en base etilenglicol a través de los tubos.	42
Tabla A.I. Nanofluidos convencionales siendo agua el fluido base.....	57
Tabla A.II. Nanofluidos híbridos siendo el agua el fluido base	59
Tabla A.III. Nanofluidos convencionales a partir de materiales carbonosos siendo el agua el fluido base.	59
Tabla A.IV. Nanofluidos híbridos a partir de materiales carbonosos siendo el agua el fluido base.	60
Tabla A.V. Nanofluidos convencionales siendo el etilenglicol el fluido base.....	62
Tabla A.VI. Nanofluidos híbridos siendo el etilenglicol el fluido base.	62
Tabla A.VII. Nanofluidos convencionales a partir de materiales carbonosos siendo el etilenglicol el fluido base.....	63
Tabla A.VIII. Nanofluidos híbridos a partir de materiales carbonosos siendo el etilenglicol el fluido base.....	63
Tabla A.IX. Propiedades de los materiales utilizados para la elaboración de los nanofluidos	64

RESUMEN

La transferencia de calor toma un papel importante en una gran cantidad de procesos y productos como sistemas de refrigeración de coches, sistemas de aire acondicionado, torres de refrigeración, climatización de piscinas y otras aplicaciones térmicas (Ranjbarzadeh y col., 2017). Los fluidos refrigerantes convencionales tienen baja conductividad térmica por lo que varios autores proponen el uso de nanofluidos (Kumar and Sonawane, 2016). Los nanofluidos son suspensiones de nanopartículas en un fluido base.

Su preparación es importante ya que es necesario obtener una suspensión uniforme, estable, sin aglomeraciones y sin cambios químicos en el fluido base (Devendiran y Amirtham, 2016). Existen dos tipos de nanofluidos, los convencionales sintetizados con nanopartículas de metales, óxidos metálicos, materiales carbonosos, etc. y los nanofluidos híbridos sintetizados con nanopartículas de composites preparados a partir de los nanomateriales anteriores (Sezer et al., 2018).

El objetivo de este trabajo es evaluar las mejoras potenciales en un intercambiador de carcasa y tubos dado, en función del fluido para calentar el agua utilizado. Para calentar el agua se tomarán como fluidos base agua y etilenglicol y se considerará la aditivación de ambos con nanofluidos convencionales o híbridos.

Para ello, en la primera parte se presentan los valores de la conductividad térmica y la viscosidad de varios nanofluidos estudiados por diversos autores. En la segunda parte se realiza un análisis del descenso del caudal volumétrico de nanofluido requerido y la caída de presión respecto a los fluidos base (agua y etilenglicol) en un intercambiador de carcasa y tubos comercial que es utilizado para mantener la temperatura del agua de una piscina. Para realizar los cálculos asociados al intercambiador de calor se empleará el método de Kern (Sinnott et al., 2005).

ABSTRACT

The heat transfer process is important in many applications like car engine cooling systems, cooling towers, air conditioning, pool heating, and other thermal applications (Ranjbarzadeh et al., 2017). The conventional heat transfer fluids have low thermal conductivity so, the use of nanofluids has been proposed to improve the process (Kumar and Sonawane, 2016). Nanofluids are suspensions of nanoparticles in a base fluid.

The synthesis of nanofluids has to be considered because they need a stable suspension, low agglomeration of particles, and no chemical reactions with the fluid (Devendiran y Amirtham, 2016). There are two types of nanofluids: conventional ones, which are synthesized with nanoparticles of metals, metal oxides, carbon nanomaterials, etc., and hybrid nanofluids, which are composed of nanoparticles of the previous materials (Sezer et al., 2018).

The objective of this work is to evaluate the potential enhancement in a shell and tube heat exchanger using nanofluids based on water or ethyleneglycol. Two types of nanofluids will be considered: conventional ones, only with one type of nanoparticles or hybrid ones that include composite materials.

The heat exchanger proposed is used to keep the temperature of the water in a swimming pool and Kern's method (Sinnott et al., 2005) is used to determine the heat transfer coefficient and evaluate the flow rate and pressure drop.

1. INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor toma un papel importante en una gran cantidad de procesos y productos como sistemas de refrigeración de coches, sistemas de aire acondicionado, torres de refrigeración, climatización de piscinas y otras aplicaciones térmicas (Ranjbarzadeh y col., 2017). Debido a la importancia del proceso, las investigaciones se centran en la mejora de la velocidad de transferencia de calor para así reducir el tiempo del proceso y mejorar la eficiencia energética (Devendiran y Amirtham, 2016).

En los intercambiadores de calor, se utilizan como medio de transferencia de calor fluidos convencionales como el agua, el etilenglicol, el keroseno,...(Huminic y Huminic, 2018). Algunos de estos fluidos tienen como desventaja su baja conductividad térmica, lo que implica un bajo rendimiento en el proceso (Kumar y Sonawane, 2016), por ello es necesario el desarrollo de mejoras.

Un método propuesto es la llamada técnica pasiva, una técnica que proporciona, en un sistema dado, mayor intercambio de calor sin adicción de energía. Esta técnica comprende propuestas como el tratamiento de superficies, la extensión de superficies, la utilización de tubos enrollados o la aditivación de los fluidos entre otros (Hasanpour y col., 2014).

En 1873, Maxwell propuso dispersar micropartículas en los fluidos para la mejora de la conductividad térmica, pero esta técnica se descartó por problemas como la sedimentación, la erosión o la alta caída de presión (Tawfik, 2017). Gracias al desarrollo de la síntesis de nanomateriales en los últimos años, se ha abierto una nueva vía de mejora del proceso, la suspensión de nanopartículas en el fluido base. Esta mezcla, denominada nanofluido, se espera que sea el nuevo medio de intercambio de calor en el futuro gracias al aumento de la conductividad térmica que aportan las nanopartículas (Seong y col., 2018).

La preparación de los nanofluidos es importante ya que es necesario obtener una suspensión uniforme, estable, sin aglomeraciones y sin cambios químicos en el fluido base (Devendiran y Amirtham, 2016). Para conseguir esa estabilidad en los nanofluidos se tienen que tener en cuenta diversas variables durante el proceso de síntesis, estas variables se recogen en la Figura 1 (Sezer y col., 2018).

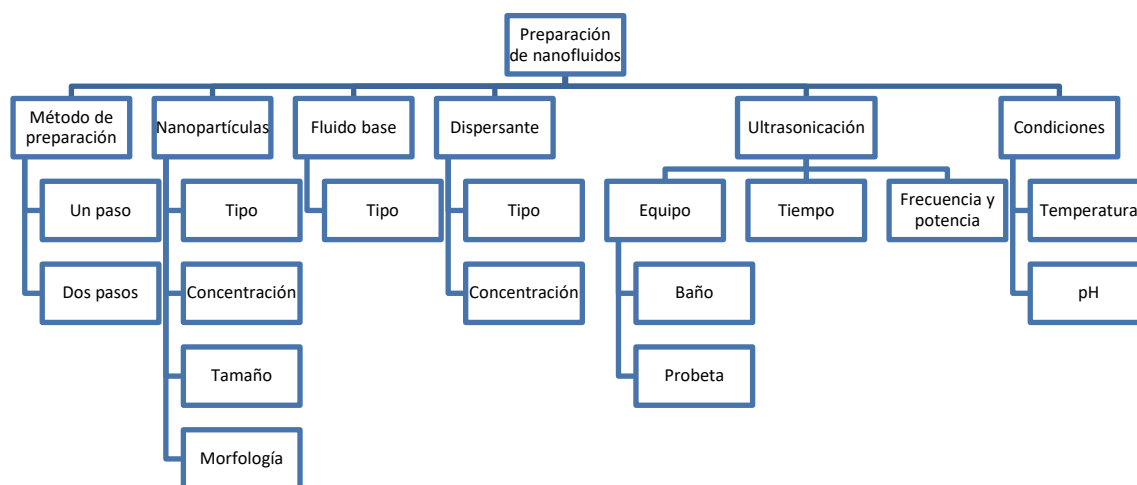


Figura 1. Variables en la síntesis de nanofluidos (Sezer y col., 2018).

Existen dos técnicas para la preparación de los nanofluidos, método de un paso y método de dos pasos. El método de un paso compagina la formación de las nanopartículas y la dispersión de estas en el fluido base en un solo paso. Un método de un paso es el método de evaporación directa de un paso, las nanopartículas se encuentran en el fluido base en fase gas y se solidifican. El método de dos pasos es el más utilizado, en un primer paso se forman las nanopartículas y en un segundo paso se dispersan en el fluido base (Devendiran y Amirtham, 2016).

Para lograr la estabilidad de los nanofluidos existen métodos químicos y métodos físicos. Los métodos químicos son la adición de surfactantes que conectan las nanopartículas con el fluido base y evitan la agregación de las nanopartículas; la modificación de la superficie de las nanopartículas; y la adición de ácidos o bases para controlar el pH. Los métodos físicos son la ultrasonificación, la homogenización y el uso de molino de bolas. El más utilizado es la ultrasonificación (Sezer y col., 2018).

Existen dos tipos de nanofluidos principalmente, los nanofluidos convencionales y los nanofluidos híbridos. Dentro de los nanofluidos convencionales existen diversos tipos (Sezer y col., 2018):

- Nanofluidos cerámicos (Al_2O_3 , CuO , TiO_2). Dichas nanopartículas son más estables químicamente en soluciones que los metales, son más resistentes a la oxidación y tienen menor densidad.
- Nanofluidos magnéticos (Co , Fe , Fe_3O_4). Estos nanofluidos contienen propiedades magnéticas. Se utilizan principalmente en electrónica, ingeniería mecánica y bioingeniería.
- Nanofluidos metálicos (Au , Ag , Cu). En la literatura, existen pocas aplicaciones referentes a este tipo de nanofluidos debido a su elevado coste.
- Nanofluidos a partir de materiales carbonosos como los nanodiamantes (ND), los nanotubos de carbono (CNT) o grafeno (G). Este tipo de materiales tienen una baja densidad y una conductividad térmica superior al resto, lo que les hace

aparecer como candidatos idóneos para esta aplicación. En la actualidad, ha surgido el estudio de los materiales carbonosos como material para la síntesis de nanofluidos debido a su elevada conductividad térmica y su baja densidad (Seong y col., 2018). En concreto, el grafeno ha atraído la atención de los investigadores como aditivo al fluido base debido a su mayor conductividad térmica frente a los nanotubos de carbono (Wang y col., 2016).

Los nanofluidos híbridos están realizados a partir de composites como por ejemplo, Al_2O_3 -CNT, SiO_2 -CNT, Ag-G, ND- Co_3O_4 , TiO_2 -Ag, ZnO-Ag. Estos combinan las propiedades físicas y químicas de los diferentes materiales, por lo que tienen mejores propiedades térmicas que los convencionales pero la desventaja es que suponen un mayor coste y complejidad de preparación (Sezer y col., 2018).

Las propiedades que más afectan al rendimiento de los fluidos en los procesos de intercambio de calor son la conductividad térmica, la viscosidad, la densidad y el calor específico. La conductividad térmica aumenta con la adición de nanopartículas lo que mejora la transferencia de calor (Devendiran y Amirtham, 2016).

La viscosidad del nanofluido es mayor que la del fluido base, esto afecta de forma negativa al bombeo y a la caída de presión, pero estos inconvenientes pueden quedar compensados con el aumento de la conductividad térmica lo que determina un aumento del coeficiente de transferencia de calor (Hemmat Esfe y Saedodin, 2015).

La densidad del nanofluido es proporcional a la concentración de nanopartículas presentes en el fluido. Esta aumenta con el aumento de la concentración de partículas en el nanofluido, lo que es positivo para el intercambio de calor pero negativo para la caída de presión en el intercambiador (Devendiran y Amirtham, 2016).

El calor específico del nanofluido depende de la concentración, la temperatura y los tipos y tamaños de las partículas. Este disminuye con el aumento de la concentración de nanopartículas, lo cual perjudica el proceso del intercambiador de calor (Devendiran y Amirtham, 2016).

Todas estas propiedades, además, dependen de la temperatura por lo que serán variables durante el funcionamiento del intercambiador de calor. La conductividad térmica aumenta con el aumento de la temperatura mientras que tanto la viscosidad y el calor específico como la densidad disminuyen con el aumento de la temperatura.

En la literatura existen modelos desarrollados como los de Maxwell y Hamilton y Crosser para la estimación de la conductividad térmica en función de los nanofluidos utilizados, los cuales están desfasados actualmente y por ello numerosos autores como Yu y Choi, Kumar y col., Jang y Choi han realizado estudios para proponer nuevos modelos que tengan en cuenta variables como el movimiento browniano además de la concentración de nanopartículas como era el caso de los anteriores (Corcione, 2011).

Además, la estimación de la viscosidad dinámica resulta importante debido a la influencia que tiene esta en la transferencia de calor. Por ello, debido a la baja viscosidad frente a los valores reales que predicen modelos antiguos como los de Einstein o Brinkman, autores como Koo o Masoumi y col. han desarrollado nuevos modelos (Corcione, 2011).

Los nuevos modelos desarrollados estaban basados en un número limitado de datos experimentales, por ello, Corcione (2011) propuso nuevas correlaciones para la predicción de la conductividad térmica y la viscosidad dinámica teniendo en cuenta un número elevado de datos experimentales en los que se han medido dichas propiedades de diversos nanofluidos, existentes en la literatura.

Existen pocos estudios que cuantifiquen el ahorro que supone el uso de los nanofluidos. Jafari y col. (2018) llevaron a cabo un estudio experimental en el cual, tras realizar el diseño de un intercambiador para aplicaciones alimenticias, realizaron pruebas con nanofluidos de alumina al 2 y 4%. Como resultado, obtuvieron una reducción del tiempo de procesamiento de zumo de sandía del 24,14 y 51,72% respectivamente. En consecuencia, obtuvieron una reducción del consumo energético de un 24,64 y 48,34%. Vahdat Azad y Vahdat Azad (2016) llevaron a cabo un diseño de un intercambiador de carcasa y tubos con la utilización de nanofluido de alumina. Obtuvieron un aumento de 185% del coeficiente de intercambio de calor en el lado de los tubos y una reducción de la caída de presión de un 94%. El coste del intercambiador de calor se redujo en más de un 55%.

A pesar de las mejoras en el proceso que sugieren los estudios previos, existen factores a tener en cuenta como la toxicidad y el vertido de las nanopartículas utilizadas para la obtención de los nanofluidos.

Las nanopartículas pueden causar efectos adversos en el medio ambiente. Moore al igual que Hund-Rinke y Simon sugirieron que la formación de especies muy reactivas basadas en oxígeno (ROS) provocadas por la presencia de nanopartículas puede provocar efectos dañinos en la biota (Bundschuh y col., 2018). Además, existen otros mecanismos de toxicidad en los sistemas acuáticos y terrestres como son la liberación de iones, la internalización o la formación de una capa superficial (Ver Figura 2).

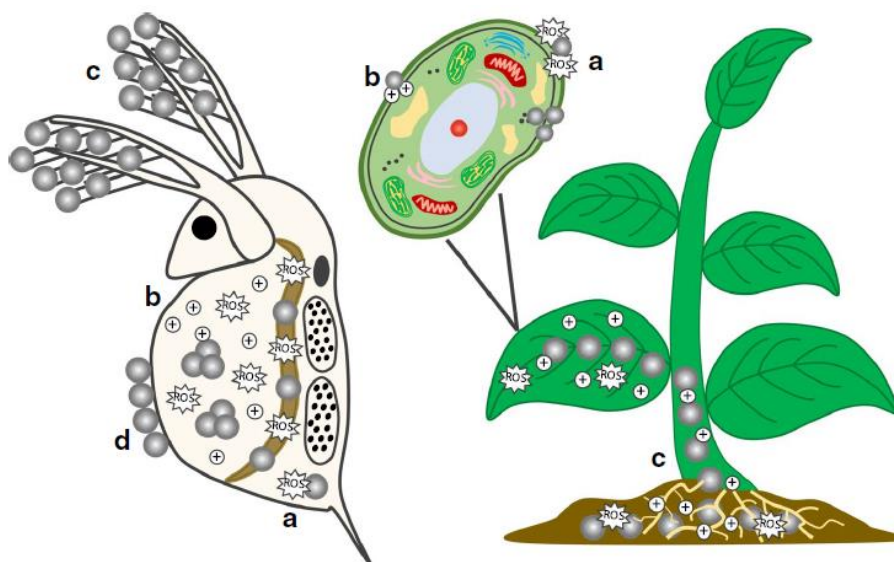


Figura 2. Mecanismos de toxicidad en sistemas acuáticos y terrestres. a formación de ROS, b liberación de iones, c internalización, y d formación de capa superficial (Bundschuh y col., 2018).

Diversos estudios muestran como las nanopartículas se pueden quedar en los lodos de depuradora, lo que supone un problema cuando se utilizan como fertilizantes. La

presencia de las nanopartículas afectan de forma negativa en la germinación y el crecimiento de las raíces de diversas plantas en la agricultura (Bundschuh y col., 2018; Bystrzejewska-Piotrowska y col., 2009).

Asimismo, estudios muestran como pigmentos fotosintéticos de algas y plantas acuáticas son alterados con la presencia de nanopartículas. También existen estudios que muestran que la acumulación de nanopartículas en plantas terrestres causa cambios bioquímicos y fisiológicos (Bundschuh y col., 2018).

Otros estudios muestran como las nanopartículas de TiO_2 o Fe_3O_4 inhiben la muda en daphnia o pulgas de agua lo que las lleva a la muerte (Bundschuh y col., 2018).

Además, las nanopartículas se pueden acumular en diferentes órganos como el hígado, los pulmones o los riñones entre otros y pueden causar riesgos para la salud provocando mayoritariamente inflamación. Las diferentes vías de exposición son principalmente la inhalación y la absorción por la piel y de forma secundaria mediante la ingestión (Missaoui y col., 2018).

Con el desarrollo de la nanotecnología, ha surgido también un nuevo tipo de residuo y con él, la necesidad de desarrollar técnicas para su tratamiento al final de su vida útil. La combustión es uno de los tratamientos para los nanomateriales ricos en carbono. Otro método es la bioacumulación en plantas y hongos. Actualmente no existe regulación para la gestión de los nanoproductos (productos que contienen nanopartículas) al final de su vida útil. El Woodrow Wilson International Center Project on Emerging Nanotechnologies (PEN) destacó la necesidad de dicha regulación. Asimismo, PEN estudia la forma de regular los nanoresiduos bajo las leyes existentes en Estados Unidos. Además, la agencia de protección medioambiental de Estados Unidos considera el tratamiento de los nanotubos de carbono por separado, tratándolos como sustancias tóxicas. Esta misma agencia planea regular los productos que contengan nanopartículas de plata (Bystrzejewska-Piotrowska y col., 2009).

Otro punto a tener en cuenta antes de la utilización de los nanofluidos es el deterioro de los materiales. Celata y col. (2014) muestran que el uso de nanofluidos pueden provocar daños severos en las bombas utilizadas en el proceso. Además, estudios posteriores sugieren que el acero inoxidable no es afectado por los nanofluidos mientras que otros materiales como el cobre es afectado por nanofluidos a partir de SiC y Al_2O_3 y el aluminio sufre grandes daños con el uso de nanofluidos a partir de ZrO_2 y Al_2O_3 (Bubbico y col., 2015). Por lo tanto, la aplicación de un nanofluido no debe considerar solo los parámetros relacionados con el intercambio de calor, sino también la compatibilidad entre los diferentes materiales.

Este trabajo surge a partir de una práctica formativa realizada en la empresa Talleres del Agua S.L., empresa dedicada a la fabricación de equipos de calentamiento y deshumidificación de piscinas y centros deportivos. Durante la estancia, se ha trabajado en el departamento de I+D colaborando en nuevos desarrollos técnicos para la mejora de la eficiencia energética y el uso sostenible del agua en procesos de climatización. Uno de los cuales, se centra en la aditivación del fluido calefactor, es decir, la utilización de nanofluidos. Por eso, en este trabajo se partirá de una configuración de intercambiador de calor comercial destinado a mantener la temperatura del agua de una piscina.

El objetivo de este trabajo es evaluar las mejoras potenciales en un intercambiador de carcasa y tubos dado, en función del fluido para calentar el agua utilizado. Para calentar el agua se tomarán como fluidos base agua y etilenglicol y se considerará la aditivación de ambos con sólo un tipo de nanopartículas, lo que se denominará nanofluidos convencionales, y con nanopartículas compuestas por varios materiales que serán los nanofluidos híbridos para minimizar el caudal volumétrico lo que supone un ahorro para el sistema.

Para ello se llevarán a cabo los siguientes objetivos parciales:

- Revisión bibliográfica de la variación de la conductividad térmica y la viscosidad de nanofluidos empleando como fluidos base agua o etilenglicol y como nanopartículas metales, óxidos metálicos, materiales carbonosos y materiales compuestos de los anteriores.
- Cálculo del caudal volumétrico y la caída de presión como parámetros de objeto de estudio para estimar las mejoras en el intercambiador de carcasa y tubos.

2. METODOLOGÍA

2.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Se establece para el estudio un intercambiador de calor comercial de 60kW utilizado para mantener la temperatura adecuada del agua de una piscina. Un intercambiador de calor de esa potencia es útil para una piscina de unos 80m³ (10x5x1,6) (Products, s. f.). Se trata de una piscina privada en la cual ya es posible la natación, una piscina infantil tendría un volumen de 30m³ y una piscina residencial de entre 100 m³ y 250 m³ (todopiscinas). En el sistema, representado en la Figura 3, se describe como el agua de la piscina, el cual circula por la carcasa, con un caudal $q_{\text{agua piscina}}$, entra a una temperatura T_{c1} y sale a una temperatura T_{c2} ; y el fluido calefactor circula por los tubos, con un caudal $q_{\text{calefactor}}$, a una temperatura de entrada T_{h1} y una temperatura de salida T_{h2} . El fluido calefactor puede ser agua o etilenglicol. El EG tiene una conductividad térmica inferior a la del agua pero se estudia debido a que se puede utilizar en un intervalo de temperatura entre -51 y 135 °C (Glycols, s. f.). Esto resulta especialmente útil en ambientes en los que la temperatura puede llegar a estar por debajo de 0 °C ya que a dichas temperaturas, el agua se solidifica y no se puede utilizar como fluido calefactor.

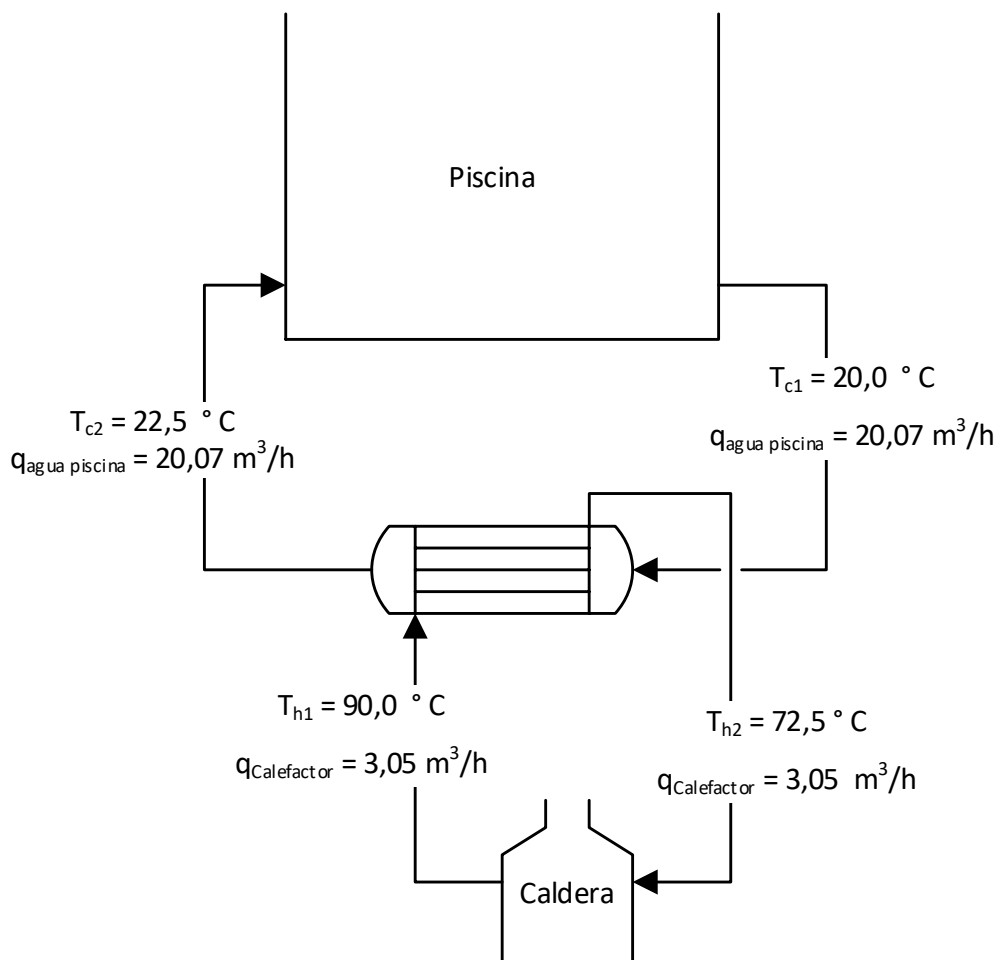


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso.

En la Tabla 1 se recogen las dimensiones del intercambiador de calor utilizado para el estudio siendo la distancia entre los centros de los tubos de 1,25 veces el diámetro exterior con un modelo triangular y en la Tabla 2 se recogen las condiciones de operación establecidas.

Tabla 1. Dimensiones del intercambiador de calor utilizado.

Dimensiones del intercambiador				
	Diámetro exterior (m)	Diámetro interior (m)	Longitud (m)	Número de tubos
Tubos	0,008	0,0068	0,313	33
Carcasa		0,08	0,44	-

Tabla 2. Condiciones de operación establecidas.

Condiciones de operación			
	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	q (m ³ /h)
Tubos (fluido calefactor)	90,0	72,5	3,05*
Carcasa (fluido de la piscina)	20,0	22,5	20,07

*El caudal establecido en el lado de los tubos se corresponde cuando el fluido calefactor es el agua.

2.2 ESPECIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica de los nanomateriales que se pueden emplear en la preparación de los nanofluidos siendo tanto el agua como el etilenglicol (EG) el fluido base. Se han recopilado los resultados de la conductividad térmica y la viscosidad de los nanofluidos en el Anexo I. En la Tabla A.I se recoge el aumento de la conductividad térmica y la viscosidad para los nanofluidos convencionales en base agua. En la Tabla A.II se recoge el aumento de la conductividad térmica y la viscosidad de los nanofluidos híbridos en base agua. El aumento de la conductividad térmica y la viscosidad para los nanofluidos convencionales en base agua con nanopartículas carbonosas se recogen en la Tabla A.III. En la Tabla A.IV se recoge el aumento de la conductividad térmica y la viscosidad de los nanofluidos híbridos en base agua con nanopartículas carbonosas. De igual forma en la Tabla A.V se recoge la variación de la conductividad térmica y la viscosidad para los nanofluidos convencionales en base etilenglicol. En la Tabla A.VI se recoge el aumento de la conductividad térmica y la viscosidad para los nanofluidos híbridos en base etilenglicol. En la Tabla A.VII se recoge el aumento de la conductividad térmica y la viscosidad de los nanofluidos convencionales en base etilenglicol con nanopartículas carbonosas. En la Tabla A.VIII se recoge el aumento de la conductividad térmica y la viscosidad de los nanofluidos híbridos en base etilenglicol con nanopartículas carbonosas.

Mayoritariamente la conductividad térmica se mide mediante el KD2 Pro, equipo que utiliza el método THW de sus siglas en inglés transient hot wire (Figura 4). Este método se basa en un pulso de calor en un sensor y se mide la respuesta de la temperatura durante y después del pulso en un sensor adyacente (Sajid y Ali, 2018). La viscosidad se mide mediante un reómetro rotacional, estos equipos se basan en el hecho de que la torsión requerida para convertir un objeto en un fluido es función de la viscosidad (Kwek y col., 2010).

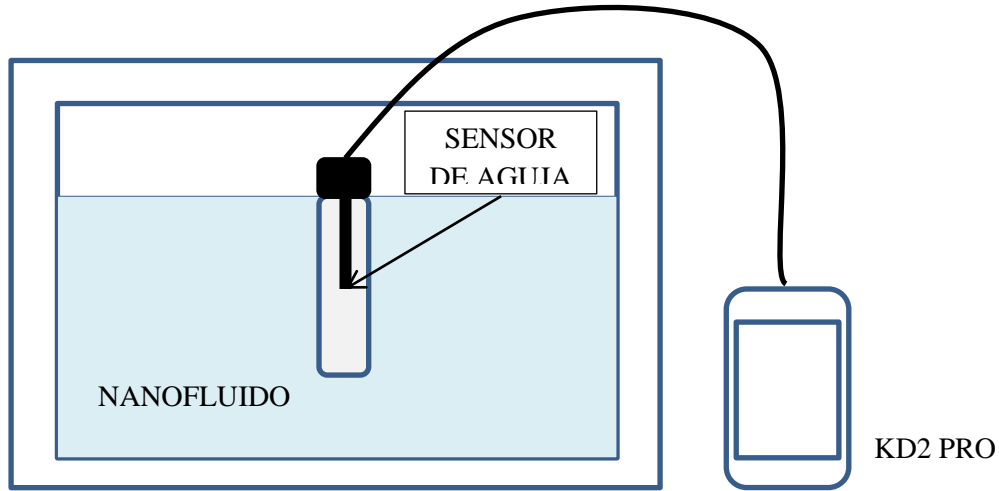


Figura 4. Medida de la conductividad térmica mediante el equipo KD2 Pro.

Para el cálculo de las propiedades de los nanofluidos se han utilizado diversas correlaciones en las que la propiedad se calcula a partir de las contribuciones del fluido base y de las nanopartículas.

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_{bf} \quad (1)$$

$$c_{p_{nf}} = \frac{\varphi c_{p_p} \rho_p + (1 - \varphi) c_{p_{bf}} \rho_{bf}}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

Las Ecuaciones 1 y 2 son las correlaciones para el cálculo de la densidad y el calor específico (Minea, 2017) en las cuales ρ es la densidad, c_p es el calor específico y φ es la fracción volumétrica de partículas en suspensión. Además, el subíndice nf se refiere al nanofluido, el subíndice p se refiere a la partícula y el subíndice bf se refiere al fluido base.

Para la obtención de la conductividad térmica y la viscosidad se utilizan las correlaciones descritas en las Ecuaciones 3 y 5 (Corcione, 2011).

$$\frac{k_{eff}}{k_{bf}} = 1 + 4,4 Re_p^{0,4} Pr^{0,66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_{bf}} \right)^{0,03} \varphi^{0,66} \quad (3)$$

Siendo Re_p el número de Reynolds de la partícula, Pr es el número de Prandtl del fluido base, T es la temperatura del nanofluido, T_{fr} es el punto de fusión del fluido base, k_p es la conductividad térmica de la partícula y φ es la fracción volumétrica de partículas en suspensión.

Como definición del número de Reynolds de la partícula (Re_p) se emplea la Ecuación 4.

$$Re_p = \frac{2\rho_{bf}k_bT}{\pi\mu_{bf}^2d_p} \quad (4)$$

Donde ρ_{bf} es la densidad del fluido base, k_b es la constante de Boltzmann, μ_{bf} es la viscosidad del fluido base y d_p es el diámetro de la partícula que en este caso toma un valor de $5 \cdot 10^{-8}$ m, un valor intermedio entre los valores utilizados en los estudios existentes en los cuales el diámetro varía manteniéndose inferior a $1 \cdot 10^{-7}$ m.

La viscosidad del nanofluido se obtiene mediante la Ecuación 5.

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{1 - 34,87 \left(\frac{d_p}{d_{bf}} \right)^{-0,3} \varphi^{1,03}} \quad (5)$$

$$d_{bf} = 0,1 \left(\frac{6M}{N\pi\rho_{bf0}} \right) \quad (6)$$

Donde d_{bf} es el diámetro equivalente de la molécula del fluido base definido en la Ecuación 6 en la cual M es el peso molecular del fluido base, N es el número de Avogadro y ρ_{bf0} es la densidad del fluido base a 293K.

Se tiene que tener en cuenta, además, que para los nanofluidos híbridos la densidad, el calor específico y la conductividad térmica de los compuestos vienen dados por las Ecuaciones 7, 8 y 9 (Minea, 2017). Cada propiedad se calcula para las nanopartículas en función de las propiedades individuales de sus componentes.

$$\rho_p = \frac{\rho_1\varphi_1 + \rho_2\varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2} \quad (7)$$

$$Cp_p = \frac{Cp_1\varphi_1 + Cp_2\varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2} \quad (8)$$

$$k_p = \varphi_1k_1 + \varphi_2k_2 \quad (9)$$

En las Ecuaciones 7, 8 y 9 el subíndice 1 se refiere al primer compuesto de la partícula híbrida y el subíndice 2 se refiere al segundo compuesto del composite.

2.3 ESPECIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Los parámetros calculados para el intercambiador son los coeficientes de transmisión de calor, tanto en el lado de la carcasa (h_s) como en el lado de los tubos (h_i), y el caudal másico en el lado de los tubos (G) necesario en función del fluido calefactor para obtener un calor total intercambiado (Q) de 60kW. Todos ellos calculados mediante el método de Kern (Sinnott y col., 2005).

2.3.1 Determinación del coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa

Para el cálculo de la distancia entre centros de tubos (P_t) el espacio del deflector (l_b) y el área del flujo cruzado (A_s), se emplean las Ecuaciones 10, 11 y 12.

$$l_b = 0,6d_s \quad (10)$$

$$P_t = 1,4 d_o \quad (11)$$

$$A_s = \frac{P_t - d_o}{P_t} d_s l_b \quad (12)$$

Donde d_o es el diámetro externo de los tubos y d_s es el diámetro de la carcasa.

$$d_e = \frac{1,10}{d_o} (P_t - 0,917d_o^2) \quad (13)$$

$$G_s = \frac{\dot{m}_s}{A_s} \quad (14)$$

A partir de los parámetros calculados con las Ecuaciones 10, 11 y 12 se obtiene el diámetro equivalente (d_e) y el flujo másico (G_s) mediante las Ecuaciones 13 y 14 respectivamente, donde \dot{m}_s es el caudal másico.

A continuación, se calculan los números adimensionales de Reynolds (Re) y Prandtl (Pr) mediante las Ecuaciones 15 y 16.

$$Re = \frac{\rho u_s d_e}{\mu} = \frac{G_s d_e}{\mu} \quad (15)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k_f} \quad (16)$$

Por último, se calcula el factor j_h para el lado de la carcasa mediante la Figura 5.

Con los resultados de las Ecuaciones 13, 15 y 16 se calcula el coeficiente de transferencia de calor mediante la Ecuación 17.

$$Nu = \frac{h_s d_e}{k_f} = j_h Re Pr^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

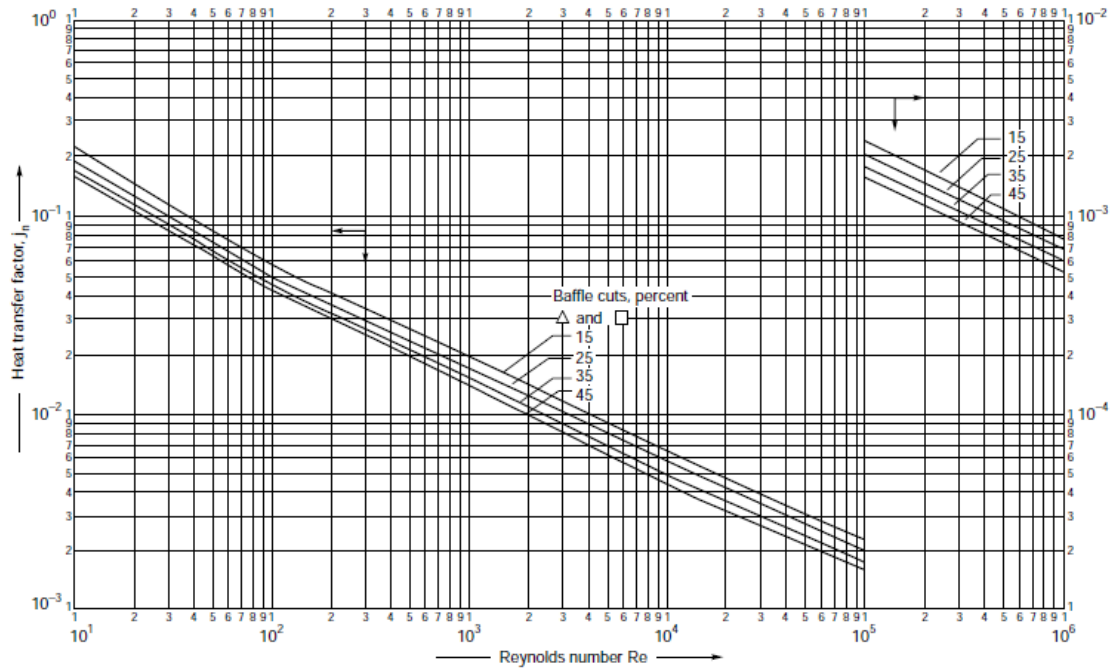


Figura 5. Factor de transferencia de calor en el lado de la carcasa. (Sinnott y col., 2005)

2.3.2 Determinación del coeficiente de transferencia de calor en el lado de los tubos

El coeficiente de transferencia de calor en el lado de los tubos se obtiene a partir de las condiciones de operación establecidas, así como de las dimensiones del intercambiador.

$$Q = UA\Delta T_m \quad (18)$$

A partir de la Ecuación 18, donde Q es el calor total intercambiado, U el coeficiente global de transferencia, A es el área de transferencia de calor y ΔT_m es la temperatura media logarítmica corregida, se obtiene el valor del coeficiente global de transferencia (U) sabiendo que Q es 60kW y las temperaturas de entrada y salida de ambos fluidos son las recogidas en la Tabla 2.

$$\Delta T_{lmt d} = \frac{(T_{h2} - T_{c1}) - (T_{h1} - T_{c2})}{\ln \left(\frac{T_{h2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c2}} \right)} \quad (19)$$

La temperatura media logarítmica se calcula a partir de la Ecuación 19 siendo:

T_{h1} es la temperatura de entrada del fluido caliente

T_{h2} es la temperatura de salida del fluido caliente

T_{c1} es la temperatura de entrada del fluido frío

T_{c2} es la temperatura de salida del fluido frío

$$R = \frac{(T_{h1} - T_{h2})}{(T_{c2} - T_{c1})} \quad (20)$$

$$S = \frac{(T_{c2} - T_{c1})}{(T_{h1} - T_{c1})} \quad (21)$$

Con los valores obtenidos de las Ecuaciones 20 y 21 se obtiene el factor de corrección para la temperatura (F) mediante la Ecuación 22.

$$F = \frac{\sqrt{(R^2 + 1) \ln \left(\frac{1 - S}{1 - RS} \right)}}{(R - 1) \ln \left[\frac{2 - S \left(R + 1 - \sqrt{(R^2 + 1)} \right)}{2 - S \left(R + 1 + \sqrt{(R^2 + 1)} \right)} \right]} \quad (22)$$

Multiplicando las Ecuaciones 19 y 22 se obtiene el valor de ΔT_m según la Ecuación 23.

$$\Delta T_m = F \Delta T_{lmt d} \quad (23)$$

El área total de transferencia de calor (A) es el área superficial exterior de los tubos, este se calcula con la Ecuación 24.

$$A = \pi d_o L N_t \quad (24)$$

Se introducen las Ecuaciones 23 y 24 en la Ecuación 18 y se obtiene el valor de U necesario para que en el proceso se intercambien 60kW.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{r_o \ln \frac{r_o}{r_i}}{k} \quad (25)$$

A partir de la Ecuación 25 se obtiene el coeficiente de transferencia de calor en el lado de los tubos (h_i) sabiendo que h_o es el coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa, d_o es el diámetro exterior de los tubos, d_i es el diámetro interior de los tubos, r_o es el radio exterior de los tubos, r_i es el radio interior de los tubos, k es la conductividad térmica del material de los tubos, en este caso 16W/m/K ya que se trata de tubos de acero inoxidable (Sinnott y col., 2005) .

2.3.3 Determinación del caudal volumétrico necesario en función del nanofluido utilizado

El flujo másico se obtiene a partir de Re definido en la Ecuación 15, pero considerando el diámetro interno de los tubos (d_i).

$$\frac{h_i d_i}{k_{nf}} = j_h Re Pr^{0.33} \quad (26)$$

El número de Re se obtiene despejando de la Ecuación 26 donde Pr es el número de Prandtl definido en la Ecuación 16 utilizando en este caso las propiedades del nanofluido, k_{nf} es la conductividad térmica del nanofluido y j_h un factor para el lado de los tubos que se obtiene a partir de la Figura 6.

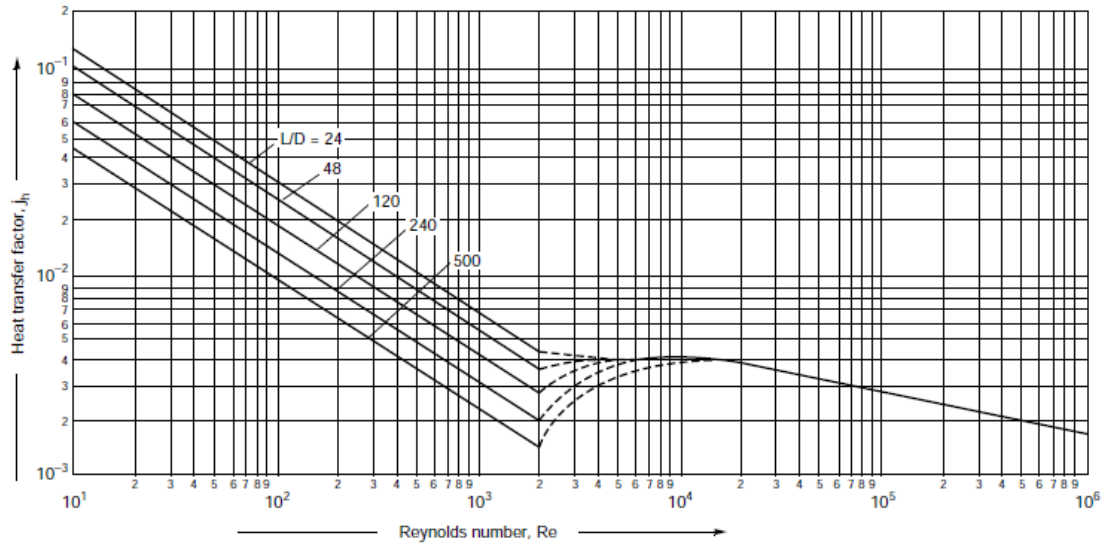


Figura 6. Factor de transferencia de calor para el lado de los tubos. (Sinnott y col., 2005)

A partir del valor de Re obtenido mediante la Ecuación 15 con las modificaciones correspondientes se obtiene el valor del flujo másico en el lado de los tubos (G) que es por donde circula el nanofluido.

$$q_{calefactor} = \frac{G}{\rho_{nf}} \cdot A_t \quad (27)$$

$$A_t = \pi r_i^2 N_t \quad (28)$$

Finalmente, a partir de la Ecuación 27 se obtiene el caudal volumétrico (q).

2.3.4 Determinación de la caída de presión en el intercambiador

2.3.4.1 Caída de presión en el lado de la carcasa

La caída de presión en el lado de la carcasa (ΔP_s) es única ya que solo utilizamos un fluido, el agua de piscina, a un caudal fijo 20,07 m³/h.

$$\Delta P_s = 8 \cdot j_f \cdot \frac{d_s}{d_e} \cdot \frac{L}{l_b} \cdot \frac{\rho u_s^2}{2} \quad (29)$$

A partir de la Ecuación 29 obtenemos ΔP_s (Sinnott y col., 2005), donde j_f es el factor de fricción, d_s es el diámetro de la carcasa (Tabla 1), d_e es el diámetro equivalente de la carcasa (Ecuación 13), L es la longitud de los tubos (Tabla 1), l_b es el espacio del deflector (Ecuación 10), ρ es la densidad del agua de la piscina y u_s es la velocidad a la que atraviesa la carcasa el agua de la piscina.

El factor de fricción (j_f) se obtiene a partir de la Figura 7.

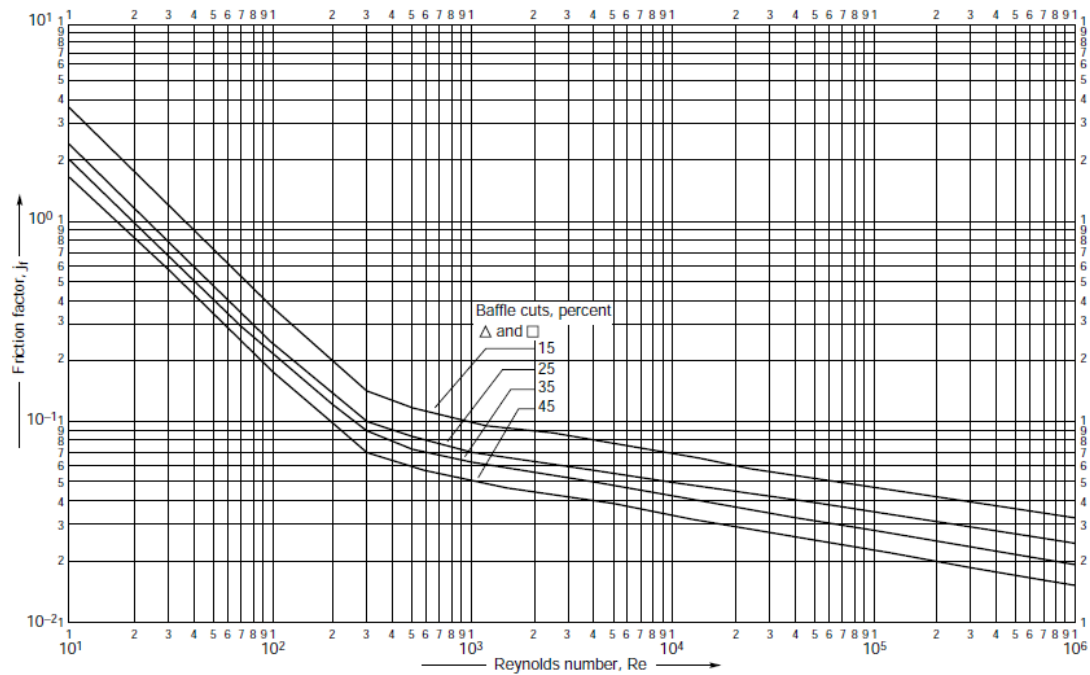


Figura 7. Factor de fricción para el lado de la carcasa (Sinnott y col., 2005).

2.3.4.2 Caída de presión en el lado de los tubos

La caída de presión en el lado de los tubos (ΔP_t) varía en función del fluido utilizado ya que varía el caudal y las propiedades.

$$\Delta P_t = N_p \left[8 \cdot j_f \cdot \frac{L}{d_i} + 2,5 \right] \cdot \frac{\rho u_t^2}{2} \quad (30)$$

$$u_t = \frac{q_{calefactor}}{A_t} \quad (31)$$

A partir de la Ecuación 30 se obtiene la caída de presión en el lado de los tubos (Sinnott y col., 2005). El factor de fricción (j_f) para el lado de los tubos se obtiene a partir de la Figura 8. La velocidad del fluido (u_t) se obtiene mediante a Ecuación 31 a partir del caudal volumétrico calculado en la sección 2.3.3 *Determinación del caudal volumétrico necesario en función del nanofluido utilizado* de este trabajo. El número de pasos por los tubos (N_p) es uno solo. La longitud de los tubos (L) y el diámetro interno de los tubos (d_i) se recogen en la Tabla 1.

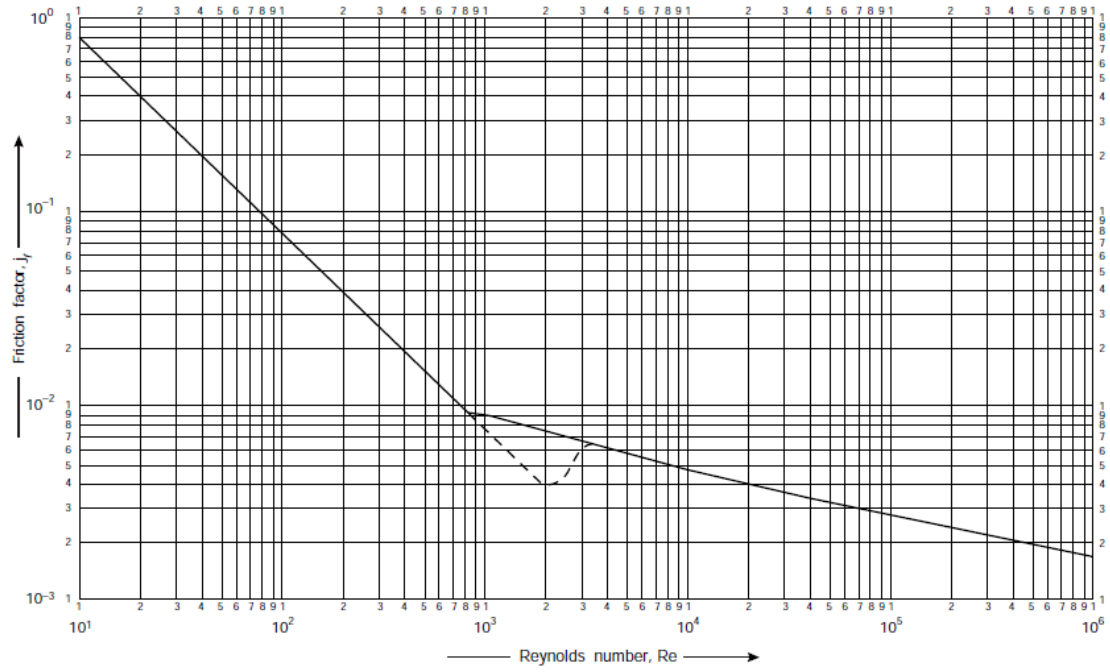


Figura 8. Factor de fricción para el lado de los tubos (Sinnott y col., 2005).

3. RESULTADOS

Este apartado se divide en dos secciones, *3.1 Caracterización de los nanofluidos* y *3.2 parámetros del intercambiador de calor*. En la primera sección se resumen los datos existentes en la literatura referentes a la conductividad térmica y la viscosidad para diferentes nanofluidos. Además, se muestran dichas propiedades para los nanofluidos estudiados en este trabajo obtenidas mediante las correlaciones mostradas en el apartado *2.2 Especificación de las propiedades de los fluidos*. En la segunda sección de este apartado se muestran los coeficientes de calor en el lado de los tubos y en el lado de la carcasa, el caudal en el lado de los tubos en función del nanofluido utilizado y la caída de presión tanto en el lado de la carcasa para el agua de piscina como en el lado de los tubos en función del nanofluido utilizado.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS NANOFLUIDOS

En la literatura existente se pueden encontrar trabajos en los que los autores han mezclado en diferentes proporciones las nanopartículas y los fluidos base, evaluando experimentalmente la variación en la conductividad térmica y en la viscosidad para un amplio rango de temperatura. Los trabajos previos se resumen en formato tabla en el ANEXO I.

En la Tabla A.I, se puede ver que los nanofluidos más estudiados son los formados en base agua con partículas de CuO, Al₂O₃, TiO₂ y CNT. Los estudios llevados a cabo se realizan principalmente a una temperatura de entre 25°C y 60°C y con una concentración de nanopartículas de entre 0,1 y 5 % (en volumen). Como ejemplo, se muestra que Alawi y col. (2018) obtuvieron una mejora de la conductividad térmica a 27°C, con una concentración del 5% volumen del 50% para nanofluidos de CuO y del 23% para nanofluidos de Al₂O₃ para iguales condiciones, 27°C y 5% volumen. Murshed y col. (2005) obtuvieron una mejora de la conductividad del 18,5% para nanofluidos de TiO₂ a temperatura ambiente con una concentración del 1% vol, una mejora muy diferente del 2,8% que obtuvieron Kim y col. (2007) en las mismas condiciones. Estudios como los de Agarwal y col (2016) y Lee y col (1999) para nanofluidos de CuO en agua difieren en las conclusiones ya que el primero obtiene una mejora de la conductividad térmica del 19% mientras que el segundo obtiene una mejora del 12% en condiciones similares. Alawi y col. (2018) obtuvieron un aumento del 3,5% en la conductividad térmica de nanofluidos con una concentración del 1% en volumen de nanopartículas de SiO₂ a una temperatura de 27°C. Este resultado difiere del obtenido por Guo y col. (2018) ya que estos obtuvieron ese mismo porcentaje de aumento de la conductividad térmica, 3,5%, para nanofluidos con una concentración del 1% en volumen de nanopartículas de SiO₂ pero esta vez a una temperatura de 20°C. Kim y col. (2007) estudiaron los nanofluidos de ZnO y obtuvieron una mejora de la conductividad térmica del 7,3% para concentraciones del 3% en volumen a una temperatura de 20°C. Un aumento del 23% en la conductividad térmica obtuvieron Hemmat Esfe y Saedodin (2015) para nanofluidos de una concentración del 0,02% en volumen de nanopartículas de MgO. Los nanofluidos a partir de ND aumentan la conductividad térmica un 12,8% para concentraciones del 1% en volumen a una temperatura de 20°C (Sundar, Hortiguera, et al., 2016). De los nanofluidos revisados, el mayor aumento de la conductividad térmica lo producen los nanofluidos formados con un 2% de concentración de Al₂Cu y Ag₂Al, los cuales producen un aumento de la

conductividad térmica de un 78% y un 90% respectivamente a una temperatura de 27°C (Chopkar et al., 2008).

En la Tabla A.II se puede ver que los nanofluidos híbridos en base agua estudiados están formados a partir de composites que tienen Ag, ND o Cu en su composición. En este tipo de nanofluidos los estudios se han llevado a cabo a temperaturas de entre 20°C y 60°C y a unas concentraciones de nanopartículas de entre 0,05 y 3% en volumen. Si se comparan los valores de los híbridos a partir de ND se obtiene que, a una temperatura de 40°C, la conductividad térmica aumenta un 12% para nanofluidos de ND-Co₃O₄ a una concentración de nanopartículas de 0,15% volumen, para nanofluidos de ND-Fe₃O₄ a una concentración del 0,2% en volumen, la conductividad térmica aumenta un 11,5% y para nanofluidos de ND-Ni a una concentración del 0,1% aumenta un 13,2% (Sundar, Irurueta, y col., 2016; Sundar, Venkata Ramana, y col., 2016; Syam Sundar y col., 2018). Autores como Hemmat Esfe, Abbasian Arani y col (2015) estudiaron nanofluidos de Ag-MgO y obtuvieron un aumento de la conductividad térmica del 15,8% para concentraciones del 0,02% en volumen a temperatura ambiente. Suresh y col. (2011) obtuvieron un aumento de la conductividad térmica del 12,1% para concentraciones del 2% en volumen de nanopartículas de Al₂O₃-Cu a temperatura ambiente. El 2% en volumen de nanopartículas de ZnO-Ag a 30°C supone un aumento de la conductividad térmica del 12,5% según N. N. Esfahani y col. (2018).

Si se comparan los resultados recogidos en la Tabla A.I con los resultados recogidos en la Tabla A.II, es decir los nanofluidos en base agua convencionales con los híbridos se observa como, por ejemplo en el caso del nanofluido de MgO, conviene utilizar el convencional con una mejora de la conductividad térmica del 23% (Hemmat Esfe y Saedodin, 2015) en lugar del híbrido Ag-MgO con una mejora inferior al anterior, 15% (Hemmat Esfe, Abbasian Arani, y col., 2015). En otros compuestos como es el caso del ND-Fe₃O₄ mejora un 9,2% la conductividad térmica frente al 4,8% del nanodiamante (ND) en las mismas condiciones (Sundar, Hortiguera, y col., 2016; Sundar, Venkata Ramana, y col., 2016). Maheshwary y col. (2017) estudió la conductividad térmica del nanofluido TiO₂ a una temperatura de 30°C y una concentración de 2,5% en peso y obtuvo un aumento del 55,7%. Una gran diferencia comparado con el 3% de aumento de la conductividad térmica que obtuvo Batmunk y col. (2014) para un nanofluido con una concentración del 3% en peso de nanopartículas de TiO₂-Ag a una temperatura de 30°C.

En la Tabla A.III se recogen los estudios de los nanofluidos convencionales en base agua con nanopartículas de compuestos carbonosos. Zhang y col. (2017) obtuvieron un aumento de la conductividad térmica del 12,5% para una concentración de 0,1% en volumen de óxido de grafeno reducido a una temperatura de 20°C y un aumento del 18,5% para la misma concentración a una temperatura de 40°C. Un menor aumento, de un 2,9%, obtuvieron Selvam y col. (2016) para nanoplatelets de grafeno a una concentración de 0,1% en volumen y una temperatura de 30°C. Jiang y col. (2015) obtuvieron un aumento de la conductividad térmica del 13,5% para una concentración del 1% volumen de CNT a una temperatura de 30°C. En este caso no encontraron influencia de la temperatura ya que a temperaturas de 40°C y 50°C con una concentración de 1% vol de CNT obtuvieron un aumento de la conductividad térmica de 13,8 y 13,5%, respectivamente. Aumento similar al obtenido para una temperatura de 30°C.

Los estudios de nanofluidos híbridos en base agua a partir de compuestos carbonosos recogidos en la Tabla A.IV se centran principalmente en nanopartículas que contienen CNT. Sundar y col. (2014) obtuvieron una mejora del 13,9% en la conductividad térmica para nanofluidos con una concentración del 0,3% en volumen de nanopartículas de Fe_3O_4 -CNT a una temperatura de 20°C. Abbasi y col. (2013) obtuvieron un aumento de la conductividad del 20,7% para nanofluidos con una concentración del 0,1% de CNT- $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ a una temperatura de 25°C, mientras que para nanofluidos de G- Al_2O_3 con una concentración de 0,1% a una temperatura de 30°C Ahammed y col. (2016) obtuvieron un aumento de la conductividad térmica inferior, de un 10%. Yarmand y col. (2016) analizaron nanofluidos de G-Pt y obtuvieron un aumento de la conductividad del 17,5% para concentraciones de 0,1% en volumen a temperaturas de 40°C mientras que Yarmand y col. (2015) obtuvieron un aumento de la conductividad térmica del 23% utilizando nanofluidos de G-Ag en las mismas condiciones, concentraciones de 0,1% en volumen y 40°C. Baghbanzade y col. (2012) estudiaron los nanofluidos a partir de CNT- SiO_2 y obtuvieron un aumento de la concentración de un 17% para concentraciones de 1% en volumen y a una temperatura de 40°C.

Comparando resultados de las Tablas A.I, A.III y A.IV se observa como a 30°C y una concentración de 0,1% vol, los nanofluidos de Al_2O_3 suponen una mejora de la conductividad térmica del 6,5%, los nanofluidos de grafeno suponen una mejora del 2,9% pero con los nanofluidos híbridos de grafeno- Al_2O_3 se obtiene una mejora del 10% (Ahammed y col., 2016; Kumar y col., 2018; Selvam y col., 2016). Se observa también que a 27°C y una concentración del 1% de nanopartículas, para nanofluidos de SiO_2 se obtiene un aumento de la conductividad térmica del 3,5% mientras que para nanofluidos de CNT- SiO_2 se obtiene un aumento del 12,3% (Alawi et al., 2018; Baghbanzadeh et al., 2012).

El número de estudios de nanofluidos con base EG es inferior al de estudios de nanofluidos en base agua. Estos se recogen en las Tablas A.V, A.VI, A.VII y A.VIII.

En el caso de los nanofluidos convencionales en base EG se muestra en la Tabla A.V como según Kim y col. (2007) los nanofluidos con una concentración de 3% en volumen de Al_2O_3 a temperatura ambiente producen un aumento de la conductividad térmica del 10% al igual que los nanofluidos con una concentración del 3% en volumen de ZnO a 20°C, mientras que los nanofluidos con concentraciones del 3% de nanopartículas de TiO_2 producen un aumento de la conductividad térmica del 12,3%. Si se comparan nanofluidos que tengan nanopartículas a partir de silicio se tiene que Akilu y col. (2017) obtuvieron un aumento de la conductividad térmica del 2,5% para nanofluidos con una concentración del 0,5% en volumen de nanopartículas de SiO_2 a 30°C mientras que Li y col. (2015) obtuvo un aumento de la conductividad del 5,9% para concentraciones de 0,2% en volumen de nanopartículas de SiC a 30°C. Agarwal y col. (2016) obtuvieron un aumento de la conductividad térmica del 16% para nanofluidos con un 2% en volumen de CuO a 30°C mientras que Kumar y Sonawane (2016) obtuvieron un aumento de la conductividad térmica del 21,6% para una concentración del 0,06% en volumen de nanopartículas de CuO a una temperatura de 30°C. De los nanofluidos recogidos en la Tabla A.V los que mayor aumento en la conductividad térmica consiguen son los formados con un 2% en volumen de Al_2Cu y Ag_2Al consiguiendo un 68% y un 78% respectivamente estudiados a una temperatura de 27°C (Chopkar y col., 2008).

Si se comparan las Tablas A.I y A.V la mejora de la conductividad térmica con nanofluidos convencionales en base EG aumenta respecto a la mejora en el caso de agua como fluido base. Kim y col. (2007) obtuvieron una mejora del 10% para nanofluidos de Al_2O_3 en base EG con una concentración del 3% volumen a una temperatura de 30°C mientras que en esas condiciones siendo el nanofluido en base agua obtuvieron una mejora del 8%. Lee y col. (1999) obtuvieron una mejora de la conductividad térmica del 22% para nanofluidos de CuO con base EG a temperatura ambiente y una concentración de 4% volumen mientras que para esas condiciones con CuO en base agua la mejora es del 12%. Como excepción se tiene los nanofluidos formados con un 2% en volumen de Al_2Cu y Ag_2Al que en el caso de agua como fluido base consiguen un aumento de la conductividad térmica del 78% y 90% respectivamente a una temperatura de 27°C mientras que en el caso de ser el EG el fluido base, en las mismas condiciones se obtiene un aumento de la conductividad del 76% y 78% respectivamente (Chopkar y col., 2008).

En el caso de los nanofluidos híbridos en base EG, como se muestra en la Tabla A.VI, existen pocos estudios. Sundar, Irurueta y col. (2016) obtuvieron un aumento de la conductividad térmica del 8,9% para una concentración del 0,15% en volumen de nanopartículas de $\text{ND-Co}_3\text{O}_4$ a una temperatura de 60°C . Toghraie y col. (2016) obtuvieron un aumento de la conductividad térmica del 32% para una concentración del 3,5% en volumen de nanopartículas de ZnO-TiO_2 a una temperatura de 50°C .

En la Tabla A.VII se muestran los estudios de nanofluidos convencionales en base EG a partir de nanopartículas de materiales carbonosos. Se observa que para CNT de una sola pared se obtiene una mejora de la conductividad térmica del 31% a una concentración del 0,75% en volumen y una temperatura de 30°C (Hemmat Esfe, Firouzi, y col., 2018), mientras que para CNT de doble pared se obtiene una mejora de la conductividad térmica del 19% para una concentración de 0,6% en volumen a una temperatura de 30°C (Shamaeil y col., 2016). Para nanofluidos con una concentración del 0,5% en volumen de grafeno a 30°C se obtiene un aumento de la conductividad térmica del 21% (Selvam et al., 2016).

En la Tabla A.VIII se muestra como los nanofluidos a partir de CNT-SiO_2 pueden alcanzar un aumento de la conductividad térmica del 38% para concentraciones de 1,71% en volumen a una temperatura de 50°C (Hemmat Esfe, Abbasian Arani, y col., 2018). En el caso de los nanofluidos con concentraciones de 2,5% en volumen de nanopartículas de $\text{CNT-Al}_2\text{O}_3$ a una temperatura de 50°C se obtiene un aumento de la conductividad térmica del 41,2% (Esfe y col., 2017). Como excepción se tiene el estudio de Afrand (2017) que obtiene un menor aumento de la conductividad térmica con el aumento de la temperatura para nanofluidos en base EG de MgO-CNT . Para una concentración de 0,6% en volumen obtiene un aumento de la conductividad térmica del 19,5%, 17,5% y 15,5% para las temperaturas de 30°C , 40°C y 50°C respectivamente (Afrand, 2017).

Si se comparan los nanofluidos convencionales en base EG de la Tabla A.V con los nanofluidos híbridos en base EG a partir de compuestos carbonosos de la Tabla A.VIII se observa como el SiO_2 en concentraciones del 2% en volumen a una temperatura de 30°C provoca un aumento de la conductividad térmica del 6% mientras que una concentración de 1,71% en volumen de CNT-SiO_2 provoca un aumento de la conductividad térmica del 21,9% a una temperatura de 30°C (Akilu y col., 2017; Hemmat Esfe, Abbasian Arani, y col., 2018).

En el caso de la viscosidad, existen muy pocos trabajos que la analicen y en todos los casos estudiados aumenta considerablemente con valores de hasta un 300% en el caso de nanofluidos de Fe_3O_4 -CNT (Amin Shahsavari y col., 2016).

Los incrementos tan notables en la conductividad térmica sugieren que el uso de estos supondría una mejora considerable en la eficiencia de un intercambiador de calor ya existente.

Para la obtención de las propiedades de los nanofluidos en las condiciones de trabajo propuestas se utilizan las correlaciones propuestas por Minea (2017) y Corcione (2011), para ello se necesitan previamente la conductividad térmica, la densidad y el calor específico de los nanomateriales con los que se forman los nanofluidos. Estas se muestran en la Tabla A.IX del ANEXO II.

3.1.1 Nanofluidos convencionales

Como ya se mencionó en el Apartado 1, los nanofluidos convencionales son aquellos que están formados por un solo material en el fluido base mientras que los nanofluidos híbridos son aquellos en los que se realizan suspensiones de nanopartículas de composites en el fluido base.

A partir de las Ecuaciones 1 y 2 se obtienen la densidad y el calor específico de los diferentes nanofluidos estudiados. Además, con las Ecuaciones 3 y 5 se calculan la conductividad térmica y la viscosidad, respectivamente. Dichas propiedades están calculadas a una temperatura de $81,3^\circ\text{C}$, temperatura media del fluido calefactor. Las propiedades obtenidas de los nanofluidos convencionales con agua y EG como fluido base se recogen en las Tablas 3 y 4 respectivamente. En ellas se observa que tanto la densidad como la conductividad térmica y la viscosidad aumentan con los nanofluidos convencionales frente al fluido base mientras que el calor específico disminuye. El aumento en la densidad y la conductividad térmica beneficia el intercambio de calor, mientras que el aumento en la viscosidad y el descenso del calor específico perjudican el proceso. Por otro lado, el aumento de la densidad, aumenta la caída de presión lo que no es deseable.

En el caso del agua como fluido base (Tabla 3), se observa que la densidad aumenta al aumentar la concentración de nanopartículas en el nanofluido convencional. Además, puede alcanzar valores del orden de 1200 kg/m^3 con la adición de 5% volumen de CuO , ZnO o Al_2Cu lo que supone un aumento del 23,39% aproximadamente y llegando a $1301,9 \text{ kg/m}^3$ con la adición de Ag_2Al . Sin embargo, la adición del 1% volumen de SiO_2 o MgO supone un incremento del 1,26% y del 2,73% de la densidad respectivamente. Respecto a las novedades en materiales carbonosos se observa que la adición de GO, grafeno o CNT al 1% en volumen implica un aumento de la densidad del orden de 1% respecto al agua. Por tanto, la adición de nanomateriales de base carbonosa prácticamente no afecta a la densidad, pero si la adición de compuestos metálicos.

Referente al calor específico de los nanofluidos convencionales en base agua, este disminuye con el aumento de la concentración de nanopartículas suspendidas en el agua. Se observa que puede disminuir desde los 4190 J/kg/K del agua hasta valores del orden de 3100 J/kg/K con la adición de Ag_2Al al 5% volumen. La menor disminución del calor específico corresponde a la adición del 1% volumen de materiales carbonosos o SiO_2 con los que se consiguen valores del orden de 4100 J/kg/K .

La conductividad térmica aumenta, con el aumento de la concentración de nanopartículas suspendidas en el agua. En todos los casos aumenta desde 0,664 W/m/K para el agua hasta valores del orden de 0,800 W/m/K para concentraciones del 1% en volumen. En el caso de los materiales carbonosos el aumento de la conductividad térmica es ligeramente superior al resto alcanzando valores de 0,867 W/m/K en el caso del grafeno. Para concentraciones superiores (5% volumen) la conductividad térmica alcanza valores de 1,200 W/m/K con la adición de Ag_2Al y llegando a valores de 1,251 W/m/K con la adición del grafeno.

En el caso de la viscosidad para los nanofluidos convencionales en base agua mostrados en la Tabla 3 se tiene una variación única independientemente de la partícula utilizada para la obtención del nanofluido ya que esta depende de la concentración y el tamaño de las nanopartículas además de las propiedades del fluido base, variables que en este estudio para el fluido base agua son iguales. Se observa una viscosidad de $3,23 \cdot 10^{-4}$ Pa·s para concentraciones del 1% en volumen y de $4,76 \cdot 10^{-4}$ Pa·s para concentraciones de partículas de 5% en volumen.

Tabla 3. Propiedades de los nanofluidos convencionales con agua como fluido base.

Fluido	% vol	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg/K)	k (W/m/K)	μ (Pa·s)
Agua	-	972,53	4190,00	0,664	3,00E-04
CuO	1	1027,80	3958,89	0,836	3,23E-04
	5	1248,90	3239,02	1,162	4,76E-04
TiO ₂	1	1005,30	4041,87	0,832	3,23E-04
	5	1136,40	3534,81	1,150	4,76E-04
Al ₂ O ₃	1	1002,50	4054,37	0,840	3,23E-04
	5	1122,40	3584,28	1,172	4,76E-04
SiO ₂	1	984,80	4112,10	0,822	3,23E-04
	5	1033,90	3819,01	1,121	4,76E-04
ZnO	1	1018,80	3986,91	0,834	3,23E-04
	5	1203,90	3330,68	1,155	4,76E-04
Al ₂ Cu	1	1021,10	3987,48	0,851	3,23E-04
	5	1215,40	3339,29	1,205	4,76E-04
Ag ₂ Al	1	1038,40	3919,91	0,852	3,23E-04
	5	1301,90	3112,89	1,207	4,76E-04
MgO	1	999,15	4071,87	0,841	3,23E-04
	5	1105,65	3656,25	1,175	4,76E-04
Nanodiamante (ND)	1	993,80	4075,40	0,857	3,23E-04
	5	1078,90	3662,18	1,224	4,76E-04
GO	1	981,90	4122,31	0,857	3,23E-04
	5	1019,40	3863,99	1,224	4,76E-04
G	1	984,80	4114,05	0,867	3,23E-04
	5	1033,90	3828,26	1,251	4,76E-04
CNT	1	983,80	4115,74	0,860	3,23E-04
	5	1028,90	3834,97	1,230	4,76E-04

En resumen, la adición de las nanopartículas en el agua como fluido base aumenta la conductividad térmica del fluido, así como la densidad y la viscosidad, mientras que el

calor específico disminuye. Por lo tanto, es necesario evaluar si el perjuicio del aumento de la viscosidad y la disminución del calor específico es compensado con el beneficio del aumento de la conductividad térmica y la densidad del fluido en el proceso de intercambio de calor.

Tabla 4. Propiedades de los nanofluidos convencionales con etilenglicol como fluido base

Fluido	% vol	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg/K)	k (W/m/K)	μ (Pa·s)
EG	-	1077,56	2650,00	0,261	3,19E-03
CuO	1	1131,78	2528,57	0,332	3,43E-03
	5	1348,68	2140,48	0,467	5,07E-03
TiO ₂	1	1109,28	2574,76	0,331	3,43E-03
	5	1236,18	2312,42	0,462	5,07E-03
Al ₂ O ₃	1	1106,48	2582,37	0,334	3,43E-03
	5	1222,18	2343,85	0,471	5,07E-03
SiO ₂	1	1088,78	2610,66	0,326	3,43E-03
	5	1133,68	2461,08	0,450	5,07E-03
ZnO	1	1122,78	2542,53	0,331	3,43E-03
	5	1303,68	2187,20	0,464	5,07E-03
Al ₂ Cu	1	1125,08	2546,00	0,338	3,43E-03
	5	1315,18	2205,16	0,485	5,07E-03
Ag ₂ Al	1	1142,38	2506,41	0,339	3,43E-03
	5	1401,68	2064,86	0,486	5,07E-03
SiC	1	1097,78	2596,35	0,336	3,43E-03
	5	1178,68	2400,14	0,478	5,07E-03
Ag	1	1171,68	2433,79	0,339	3,43E-03
	5	1548,18	1831,84	0,487	5,07E-03
G	1	1088,78	2612,42	0,345	3,43E-03
	5	1133,68	2469,53	0,504	5,07E-03
CNT	1	1087,78	2612,57	0,342	3,43E-03
	5	1128,68	2469,62	0,496	5,07E-03

En la Tabla 4 se muestra para el caso de los nanofluidos con EG como fluido base como la densidad aumenta desde 1077,56 kg/m³ hasta valores del orden de 1140 kg/m³ para una concentración del 1% volumen de Ag₂Al, llegando a 1548,18 kg/m³ para una concentración de 5% volumen añadiendo Ag.

El calor específico para nanofluidos convencionales en base EG disminuye entre 37,43 J/kg/K con la adición del 1% en volumen de CNT y 819 J/kg/K con la adición del 5% en volumen de Ag respecto al valor del fluido base. Siendo la adición de Ag el componente que mayor disminución del calor específico provoca mostrándose valores de 2433,79 J/kg/K y 1831,84 J/kg/K para concentraciones de 1% y 5% en volumen respectivamente.

En el caso de la conductividad térmica, en los nanofluidos convencionales en base EG, aumenta desde 0,261W/m/K del EG a valores de 0,33 W/m/K para concentraciones de 1% volumen de los materiales estudiados siendo los compuestos carbonosos los que mayor aumento provocan llegando a valores de 0,345 con la adición de grafeno. Para

concentraciones del 5% volumen se observan valores superiores a 0,450 W/m/K siendo el mayor valor 0,504 W/m/K correspondiente al nanofluido de grafeno.

Además, se observa que la viscosidad, al igual que en el caso anterior, solo varía en función de la concentración y no depende del tipo de nanopartícula. Esta aumenta a $3,43 \cdot 10^{-3}$ Pa·s y $5,07 \cdot 10^{-3}$ Pa·s para concentraciones de 1 y 5% volumen de nanopartículas suspendidas en EG respectivamente, independientemente del compuesto que se añada.

Por lo tanto, es necesario evaluar si la disminución del calor específico y el aumento de la viscosidad queda compensado con el aumento de la conductividad térmica y la densidad para poder concluir si la utilización de los nanofluidos beneficia el intercambio de calor.

3.1.2 Nanofluidos híbridos

En primer lugar se calculan las propiedades de los composites utilizados para la formación de los nanofluidos híbridos. Las propiedades de los composites han sido calculadas con las Ecuaciones 7, 8 y 9 a una temperatura de 81,3°C y se recogen en la Tabla 5.

En la Tabla 5 se recoge, además de las propiedades, el porcentaje de cada componente presente en el composite para la formación del nanofluido híbrido, siendo p_1 el primer compuesto y p_2 el segundo compuesto mencionado al nombrar el composite, por ejemplo en el caso del composite ND-Co₃O₄, p_1 corresponde al porcentaje de ND y p_2 se corresponde con el porcentaje de Co₃O₄.

Tabla 5. Propiedades de los composites.

Composite	% p_1	% p_2	c_p composite (J/kg/K)	ρ composite (kg/m ³)	k composite (W/m/K)
ND-Co ₃ O ₄	0,67	0,33	518,45	4093,30	675,84
ND-Fe ₃ O ₄	0,72	0,28	559,12	3858,80	765,08
ND-Ni	0,85	0,15	504,60	3970,30	850,00
Ag-MgO	0,50	0,50	589,00	7062,50	238,50
SiO ₂ -Cu	0,50	0,50	544,00	5570,00	201,10
Al ₂ O ₃ -Cu	0,50	0,50	575,00	6455,00	220,50
ZnO-Ag	0,50	0,50	365,10	8045,00	221,00
TiO ₂ -Ag	0,50	0,50	460,60	7370,00	218,98
Fe ₃ O ₄ -CNT	0,50	0,50	690,50	3955,00	830,50
Al ₂ O ₃ -CNT	0,50	0,50	738,00	3035,00	770,00
Al ₂ O ₃ -G	0,50	0,50	777,50	3085,00	2520,00
Ag-G	0,50	0,50	512,50	6345,00	2714,50
TiO ₂ -G	0,50	0,50	738,10	3225,00	2504,48
Ag-CNT	0,50	0,50	473,00	6295,00	964,50
ZnO-TiO ₂	0,50	0,50	590,70	4925,00	10,98
SiO ₂ -CNT	0,50	0,50	707,00	2150,00	750,60
MgO-CNT	0,50	0,50	827,00	2867,50	774,00

En el análisis de las propiedades de los composites mostradas en la Tabla 5 se observa que el calor específico de todos ellos varía en el intervalo de 365 J/kg/K a 827 J/kg/K siendo el composite ZnO-Ag el de menor calor específico y el composite MgO-CNT el correspondiente al mayor valor. La densidad de los composites varía en un mayor rango, desde 2150 kg/m³ para el composite de SiO₂-CNT hasta valores de 8045 kg/m³ para el composite de ZnO-Ag. Los mayores valores provienen de los compuestos a partir de Ag y Cu, mientras que los compuestos a partir de CNT o grafeno (G) rondan valores de entre 2000 kg/m³ y 4000 kg/m³ a excepción del composite Ag-G que tiene una densidad de 6345 kg/m³. En el caso de la conductividad térmica, los composites formados con CNT tienen una conductividad térmica entre 750,00 W/m/K y 964,50 W/m/K. Los composites formados a partir de grafeno tienen una conductividad superior con valores de entre 2520,00 W/m/K y 2714,50 W/m/K. Destaca como valor anormalmente bajo la conductividad térmica del composite ZnO-TiO₂ de 10,98 W/m/K, lo cual es posible que aumente en menor medida la conductividad térmica del nanofluido.

Una vez determinadas las propiedades de los composites, se puede proceder a evaluar como la adición de estos al fluido base afecta a las propiedades del fluido que se introduce en el intercambiador de calor.

En las Tablas 6 y 7 se recogen la densidad y el calor específico para los nanofluidos híbridos con base agua y EG respectivamente, además de la conductividad térmica y la viscosidad, todas ellas obtenidas a una temperatura de 81,3°C. En el caso de los nanofluidos híbridos, la tendencia es semejante al caso de los nanofluidos convencionales, la densidad, la conductividad térmica y la viscosidad aumentan con la adición de las nanopartículas mientras que el calor específico disminuye con la adición de nanopartículas respecto al fluido base.

En el caso de los nanofluidos híbridos en base agua, la densidad alcanza valores del orden de 1000 kg/m³ con la adición del 1% en volumen de la mayoría de los compuestos analizados a excepción de los composites que presentan materiales carbonosos. En el caso de nanofluidos que contienen nuevos compuestos carbonosos la variación de la densidad para concentraciones del 1% en volumen es del 2% aproximadamente a excepción de los nanofluidos formados por Fe₃O₄-CNT, Ag-G y Ag-CNT en los que la densidad varía aproximadamente un 3%. Para concentraciones de 5% volumen se muestran valores del orden de 1100 kg/m³ a excepción de los nanofluidos que presentan Ag o Cu en los composites que alcanzan valores superiores llegando a alcanzar un valor de 1326,15 kg/m³ con la adición de ZnO-Ag.

Referente a la conductividad térmica, todos los nanofluidos híbridos en base agua, con concentraciones del 1% vol, alcanzan valores del orden de 0,850 W/m/K a excepción de los nanofluidos híbridos a partir de composites con presencia de grafeno (Al₂O₃-G, Ag-G y TiO₂-G) que alcanzan un valor ligeramente superior, 0,863 W/m/K. Para concentraciones del 5% volumen, la conductividad térmica alcanza valores del orden de 1,200 W/m/K para todos los nanofluidos híbridos en base agua siendo el nanofluido formado por Ag-G el que mayor conductividad térmica alcanza con una conductividad térmica de 1,241 W/m/K.

Analizando los valores del calor específico se observa que disminuye con el uso de los nanofluidos híbridos en base agua al igual que con los nanofluidos convencionales en base agua. Para una concentración de 1% volumen se observan valores del orden de

4000 J/kg/K para la mayoría excepto para los compuestos que tienen plata o cobre en su composición que muestran valores del orden de 3900 J/kg/K. El menor calor específico con valor de 3029,83 J/kg/K se obtiene con la adición de ZnO-Ag a una concentración de 5% volumen.

La viscosidad varía de igual forma que en los nanofluidos convencionales en base agua, con valores de $3,23 \cdot 10^{-4}$ Pa·s y $4,76 \cdot 10^{-4}$ Pa·s para concentraciones de 1 y 5% volumen respectivamente independientemente del nanofluido utilizado.

Por lo tanto, al igual que con los nanofluidos convencionales, se necesita comprobar si la disminución del calor específico y el aumento de la viscosidad quedan compensados con el aumento de la densidad y la conductividad térmica.

Tabla 6. Propiedades de los nanofluidos híbridos con agua como fluido base.

Fluido	% volumen	ρ (kg/m ³)	μ (Pa·s)	k (W/m/K)	c_p (J/kg/K)
Agua	-	972,53	3,00E-04	0,664	4190,00
ND-Co ₃ O ₄	1	1003,74	3,23E-04	0,855	4040,27
	5	1128,57	4,76E-04	1,217	3524,17
ND-Fe ₃ O ₄	1	1001,39	3,23E-04	0,856	4050,09
	5	1116,84	4,76E-04	1,219	3562,75
ND-Ni	1	1002,51	3,23E-04	0,856	4044,04
	5	1122,42	4,76E-04	1,221	3538,19
Ag-MgO	1	1033,43	3,23E-04	0,849	3943,91
	5	1277,03	4,76E-04	1,200	3194,25
SiO ₂ -Cu	1	1018,50	3,23E-04	0,848	3990,61
	5	1202,40	4,76E-04	1,197	3345,52
Al ₂ O ₃ -Cu	1	1027,35	3,23E-04	0,849	3962,86
	5	1246,65	4,76E-04	1,199	3254,10
ZnO-Ag	1	1043,25	3,23E-04	0,849	3895,04
	5	1326,15	4,76E-04	1,199	3029,83
TiO ₂ -Ag	1	1036,50	3,23E-04	0,849	3924,82
	5	1292,40	4,76E-04	1,199	3126,64
Fe ₃ O ₄ -CNT	1	1002,35	3,23E-04	0,856	4051,92
	5	1121,65	4,76E-04	1,220	3573,03
Al ₂ O ₃ -CNT	1	993,15	3,23E-04	0,856	4084,51
	5	1075,65	4,76E-04	1,219	3703,00
Al ₂ O ₃ -G	1	993,65	3,23E-04	0,863	4084,05
	5	1078,15	4,76E-04	1,239	3701,78
Ag-G	1	1026,25	3,23E-04	0,863	3962,63
	5	1241,15	4,76E-04	1,241	3250,00
TiO ₂ -G	1	995,05	3,23E-04	0,863	4078,12
	5	1085,15	4,76E-04	1,239	3677,06
SiO ₂ -CNT	1	984,30	3,23E-04	0,856	4113,92
	5	1031,40	4,76E-04	1,219	3826,98
Ag-CNT	1	1025,75	3,23E-04	0,857	3961,89
	5	1238,65	4,76E-04	1,223	3245,49

Además, se compara, por ejemplo, las propiedades del nanofluido convencional ND frente al nanofluido híbrido ND-Co₃O₄ se observa que mientras la densidad es mayor en el nanofluido híbrido, la conductividad térmica es mayor en el caso del nanofluido convencional, siendo 993,8 kg/m³ y 0,857 W/m/K frente a los valores 1003,74 kg/m³ y 0,855 W/m/K del nanofluido híbrido; el calor específico es mayor en el nanofluido convencional ND siendo en este caso 4075,4 J/kg/K frente a los 4040,27 J/kg/K del nanofluido híbrido. La viscosidad se mantiene igual. Todo ello analizado a una concentración de 1% vol.

Comparando nanofluidos híbridos entre CNT y otro compuesto se observa como los nanofluidos híbridos SiO₂-CNT y Al₂O₃-CNT varían los valores de la densidad y el calor específico y la conductividad térmica menos de un 1% comparados con el nanofluido convencional CNT. Sin embargo, el nanofluido híbrido Ag-CNT aumenta la densidad un 4,2% y disminuye el calor específico un 3,74% y la conductividad térmica varía menos del 1% respecto al nanofluido convencional CNT.

En el caso de los nanofluidos híbridos ZnO-Ag, TiO₂-Ag y MgO-Ag la densidad es del orden de 1030 kg/m³, el calor específico es del orden de 3900 J/kg/K y la conductividad térmica es del orden de 0,85 W/m/K. En el caso del nanofluido híbrido ZnO-Ag, la densidad aumenta un 2,4% respecto a la del nanofluido convencional ZnO, el calor específico disminuye un 2,3% y la conductividad térmica aumenta un 1,79%. La incorporación de plata al TiO₂ supone un aumento de la densidad del 3,1%, una disminución del calor específico del 2,9% y un aumento de la conductividad térmica del 2%. La incorporación de plata al MgO supone un aumento de la densidad del 3,43%, una disminución del calor específico del 3,14% y un aumento de la conductividad térmica del 0,95%.

Por tanto, en general la mejora en la conductividad térmica y la densidad que supone añadir nanopartículas híbridos en agua frente a los convencionales siempre es inferior al 5%.

Tabla 7. Propiedades de los nanofluidos híbridos con etilenglicol como fluido base

Fluido	% volumen	ρ (kg/m ³)	μ (Pa·s)	k (W/m/K)	c_p (J/kg/K)
EG	-	1077,56	3,19E-03	0,261	2650
ND-Co ₃ O ₄	1	1107,72	3,43E-03	0,340	2571,23
	5	1228,35	5,07E-03	0,490	2294,84
ZnO-TiO ₂	1	1116,03	3,43E-03	0,331	2559,12
	5	1269,93	5,07E-03	0,463	2250,68
Fe ₃ O ₄ -CNT	1	1106,33	3,43E-03	0,341	2579,95
	5	1221,43	5,07E-03	0,491	2332,76
Al ₂ O ₃ -CNT	1	1097,13	3,43E-03	0,340	2597,11
	5	1175,43	5,07E-03	0,491	2403,16
SiO ₂ -CNT	1	1088,28	3,43E-03	0,340	2611,61
	5	1131,18	5,07E-03	0,491	2465,35
MgO-CNT	1	1095,46	3,43E-03	0,340	2602,28
	5	1167,06	5,07E-03	0,491	2426,04

En el caso de los nanofluidos híbridos con base EG, se observa en la Tabla 7 un aumento de la densidad desde $1077,56 \text{ kg/m}^3$ hasta valores del orden de 1200 kg/m^3 con la adición de ND- Co_3O_4 , ZnO- TiO_2 y Fe_3O_4 -CNT al 5% volumen. Sin embargo, con la adición de Al_2O_3 -CNT, SiO_2 -CNT y MgO-CNT al 1% volumen esta varía menos del 2% respecto al fluido base EG

La conductividad térmica aumenta desde $0,261 \text{ W/m/K}$ hasta valores de $0,340 \text{ W/m/K}$ para concentraciones del 1% en volumen de todos los nanofluidos híbridos en base EG analizados y de $0,490 \text{ W/m/K}$ para todos los nanofluidos híbridos con base EG estudiados a una concentración del 5 % volumen. Como excepción se tiene el nanofluido ZnO- TiO_2 que se obtiene una conductividad térmica de $0,331 \text{ W/m/K}$ y $0,463 \text{ W/m/K}$ para concentraciones del 1% y el 5% en volumen respectivamente.

El calor específico disminuye hasta valores del orden de 2200 J/kg/K añadiendo ND- Co_3O_4 y ZnO- TiO_2 al 1% volumen. Sin embargo, la disminución del calor específico es menor del 2% con la adición de SiO_2 -CNT y MgO-CNT al 1% volumen.

Además, en este caso se puede comparar, por ejemplo, el fluido híbrido Al_2O_3 -CNT con los fluidos convencionales de Al_2O_3 y de CNT. La densidad del nanofluido híbrido es de $1097,13 \text{ kg/m}^3$, un valor intermedio frente a la densidad del nanofluido de Al_2O_3 ($1106,48 \text{ kg/m}^3$) y a la densidad del nanofluido de CNT ($1087,78 \text{ kg/m}^3$). La conductividad térmica del nanofluido híbrido es de $0,34 \text{ W/m/K}$ y al igual que ocurre con la densidad, se trata de un valor intermedio entre la conductividad térmica del nanofluido de Al_2O_3 ($0,334 \text{ W/m/K}$) y de CNT ($0,342 \text{ W/m/K}$). Con el calor específico ocurre igual que con el resto de propiedades, se obtiene un valor intermedio de $2597,11 \text{ J/kg/K}$.

El nanofluido híbrido TiO_2 -ZnO tiene una densidad de $1116,03 \text{ kg/m}^3$, el calor específico es de $2559,12 \text{ J/kg/K}$ y la conductividad térmica tiene un valor de $0,331 \text{ W/m/K}$. Estos valores son del mismo orden que los nanofluidos convencionales formados con TiO_2 o ZnO.

Por lo tanto, se tiene que los nanofluidos híbridos tienen mejores propiedades que los convencionales para el proceso de intercambio de calor siendo los de mayor aumento de la conductividad térmica y la densidad los formados por Ag-G y Ag-CNT. Por otro lado, los nanofluidos convencionales que mayor aumento de la conductividad térmica y la densidad producen son los formados a partir de Al_2Cu , Ag_2Al y Ag. Además se tiene que las propiedades mejoran con el aumento de la concentración de las nanopartículas tanto para los nanofluidos convencionales como para los híbridos. En el caso del calor específico, éste disminuye en todos los casos pero es posible que quede compensado, al igual que el aumento de la viscosidad, con las mejoras que producen el aumento de la densidad y la conductividad térmica en el intercambio de calor. De ahí, la necesidad de cuantificar los efectos de esta variabilidad en las variables de operación del intercambiador de calor.

3.2 PARÁMETROS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Para poder considerar las potenciales mejoras que se producen en el intercambio de calor con el uso de nanofluidos se obtienen a continuación los coeficientes de transferencia de calor tanto para el lado de la carcasa, como para el lado de los tubos. Además, en este apartado se obtiene el caudal necesario en función del nanofluido

utilizado para la obtención de 60kW de calor intercambiado así como la caída de presión en el intercambiador.

3.2.1 Coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa

En el caso del coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa h_o , el valor no depende del nanofluido utilizado, ya que en ese lado el fluido que actúa en el caso de estudio es el agua de la piscina. Se utilizan las Ecuaciones de la 10 a la 17 y se obtiene un coeficiente de transferencia de calor de 16542,71 W/m²/°C. Los valores de los cálculos intermedios se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Cálculos intermedios para la obtención del coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa.

l_b (m)	0,06
P_t (m)	0,01
A_s (m²)	$9,60 \cdot 10^{-4}$
d_e (m)	$5,68 \cdot 10^{-3}$
G_s (kg/m²/s)	$5,80 \cdot 10^3$
Re	$3,30 \cdot 10^4$
Pr	7,04
j_h	$2,5 \cdot 10^{-3}$

3.2.2 Coeficiente de transferencia de calor en el lado de los tubos

Las condiciones de operación descritas en la Tabla 2 determinan el coeficiente de transferencia de calor en el lado de los tubos.

A partir de las Ecuaciones 19 y 22 se obtiene un incremento de temperatura medio logarítmico (ΔT_{lmtd}) de 59,65°C y un factor de corrección de la temperatura (F) de 0,998. Con esos datos se obtiene un ΔT_m de 59,53°C mediante la Ecuación 23.

A continuación, se calcula el área total de transferencia de calor (A) mediante la Ecuación 24 y se obtiene un área de 0,259 m².

A partir de los datos anteriores, para un calor total intercambiado de 60kW y con la Ecuación 18 se obtiene un coeficiente global de transferencia de calor (U) de 3882,70 W/m²/°C.

Finalmente, mediante la Ecuación 25 obtenemos el coeficiente de transferencia de calor en el lado de los tubos, h_i , obteniéndose un valor de 7518,67 W/m²/°C.

3.2.3 Determinación del caudal volumétrico necesario en función del nanofluido utilizado

Dado que se ha planteado que se dispone de un intercambiador de calor comercial y las condiciones de temperatura de ambos fluidos también están predefinidas, se determinará el caudal volumétrico del fluido calefactor necesario para conseguir un calor total intercambiado de 60kW. Esto permitirá cuantificar el ahorro que supondría trabajar con los diferentes nanofluidos frente al caso de operar con los fluidos base.

3.2.3.1 Nanofluidos convencionales

En este apartado se muestra el caudal volumétrico necesario para obtener 60kW de calor intercambiado con el uso de nanofluidos convencionales. A partir de la Ecuación 26, se obtiene el valor de Re para los diferentes nanofluidos. Con los valores de Re obtenidos y la Ecuación 15 se obtiene el flujo másico en el lado de los tubos (G) necesario en función de los nanofluidos. En las Tablas 9 y 10 se recogen los valores de Re y G de los nanofluidos convencionales en base agua y EG respectivamente.

Tabla 9. Valores del número de Reynolds y flujo másico en función del nanofluido utilizado siendo estos convencionales y en base agua.

Fluido	% volumen	Re	G (kg/s/m ²)
Agua	-	1,56E+04	687,97
CuO	1	1,33E+04	630,89
	5	1,00E+04	701,86
TiO ₂	1	1,32E+04	628,66
	5	9,80E+03	686,61
Al ₂ O ₃	1	1,31E+04	624,15
	5	9,63E+03	674,73
SiO ₂	1	1,33E+04	630,09
	5	9,72E+03	680,63
ZnO	1	1,33E+04	630,54
	5	9,96E+03	698,00
Al ₂ Cu	1	1,31E+04	621,99
	5	9,68E+03	678,08
Ag ₂ Al	1	1,32E+04	625,19
	5	9,90E+03	693,25
MgO	1	1,31E+04	622,78
	5	9,55E+03	669,25
ND	1	1,29E+04	614,38
	5	9,29E+03	650,93
GO	1	1,29E+04	612,07
	5	9,13E+03	639,50
G	1	1,28E+04	607,93
	5	9,02E+03	631,92
CNT	1	1,29E+04	611,26
	5	9,12E+03	638,70

En la Tabla 9, se observa como los valores de Re para un coeficiente de transferencia de calor dado disminuyen con el uso de nanofluidos siendo estos de valores del orden de $1,3 \cdot 10^4$ para concentraciones de 1% volumen y del orden de $9,5 \cdot 10^3$ para concentraciones de 5% volumen. El hecho de que los valores de Re sean similares para una concentración dada puede ser debido a que la viscosidad y la densidad no varían sustancialmente en el rango de concentraciones de nanopartículas propuesto en este trabajo. Se observa además, que el caudal másico necesario para el proceso es menor con el uso de la mayoría de los nanofluidos convencionales que con el uso del agua. En el caso de los nanofluidos a partir de CuO al 5% en volumen, así como con el uso de

nanofluidos de ZnO (5% volumen) y Ag₂Al (5% volumen) el caudal másico necesario aumenta respecto al caudal másico del agua.

Tabla 10. Valores del número de Reynolds y flujo másico en función del nanofluido utilizado siendo estos convencionales y en base etilenglicol.

Fluido	% Volumen	Re	G (kg/s/m ²)
EG	-	1,55E+04	7292,76
CuO	1	1,31E+04	6617,53
	5	9,69E+03	7222,89
TiO ₂	1	1,31E+04	6600,72
	5	9,52E+03	7091,07
Al ₂ O ₃	1	1,30E+04	6551,96
	5	9,35E+03	6966,56
SiO ₂	1	1,31E+04	6625,37
	5	9,49E+03	7067,85
ZnO	1	1,31E+04	6617,73
	5	9,66E+03	7198,95
Al ₂ Cu	1	1,29E+04	6521,64
	5	9,36E+03	6974,79
Ag ₂ Al	1	1,30E+04	6551,98
	5	9,56E+03	7120,12
SiC	1	1,29E+04	6508,49
	5	9,19E+03	6843,81
Ag	1	1,31E+04	6610,34
	5	9,92E+03	7394,64
G	1	1,26E+04	6382,56
	5	8,79E+03	6545,84
CNT	1	1,27E+04	6419,66
	5	8,89E+03	6621,88

Analizando los datos de la Tabla 10 donde se comparan nanofluidos convencionales en base EG se observa que los números de Re son similares a los mostrados para los nanofluidos convencionales en base agua en la Tabla 9. Para concentraciones de 1% en volumen tiene un valor del orden de $1,3 \cdot 10^4$ mientras que para concentraciones de 5% en volumen disminuyen hasta valores del orden de $9,5 \cdot 10^3$ siendo el menor valor $8,79 \cdot 10^3$ para el nanofluido G en base EG. El hecho de que los valores de Re sean similares en el caso de los nanofluidos en base agua y en base EG se debe a que el coeficiente de transferencia de calor en el intercambiador no varía, lo que se varía es el caudal volumétrico. Analizando los flujos másicos necesarios para los nanofluidos convencionales en base EG, se observa que están comprendidos entre 6382,56 kg/s/m² para nanofluidos con una concentración del 1% de G y 7394,64 kg/s/m² para nanofluidos con una concentración del 5% de Ag, siendo estos valores de un orden de magnitud superior a los mostrados en la Tabla 9 para los nanofluidos en base agua. Esta gran diferencia se debe a los valores de conductividad térmica del fluido base que son considerablemente inferiores en el caso del EG con respecto al agua.

Con un fluido dado, un número menor de Re implicaría un menor coeficiente de transferencia, con lo cual, el hecho de que para los nanofluidos se obtenga un número menor de Re significa que o bien se aumenta el coeficiente de transferencia de calor en el lado de los tubos para un caudal volumétrico dado, o bien como se supone es en nuestro caso, que el caudal volumétrico necesario para el proceso es menor.

Dado que la densidad de los nanofluidos es superior a la del fluido base, para conocer la mejora que aportan y poder realizar una comparación se necesita obtener el caudal volumétrico en lugar del flujo másico.

Mediante la Ecuación 27 se obtiene el caudal volumétrico necesario en función del nanofluido utilizado para mantener la temperatura del agua de la piscina propuesta, lo que supone que el intercambiador debe ascender a 60kW. Los resultados se representan en las Figuras 9 y 10 para los nanofluidos convencionales con base agua y EG respectivamente.

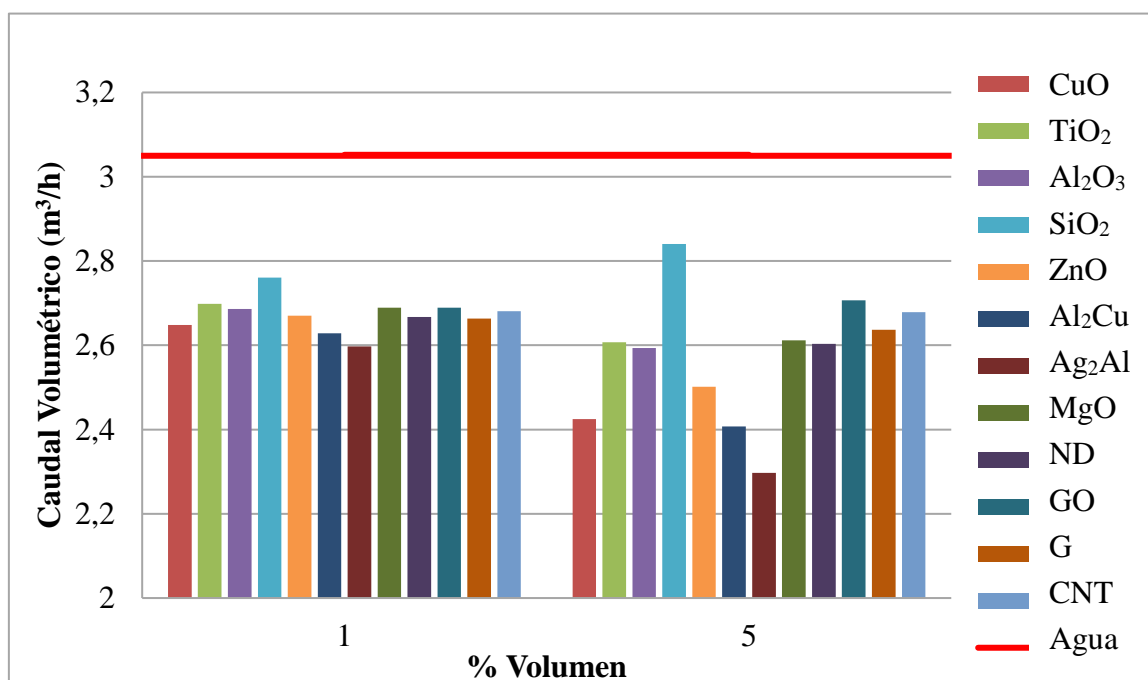


Figura 9. Caudal volumétrico necesario en función del nanofluido convencional en base agua utilizado.

En la Figura 9 se muestra una disminución del caudal necesario utilizando nanofluidos convencionales en base agua en lugar de solo el fluido base, lo cual confirma la hipótesis de partida. Con el uso de la mayoría de los nanofluidos en el sistema disminuyen los requerimientos de caudal al aumentar la concentración del compuesto excepto en el caso del nanofluido SiO_2 en el cual el caudal necesario es menor para una concentración de 1% volumen. El nanofluido que menor caudal necesita para conseguir 60kW es el Ag_2Al a una concentración de 5% volumen, que necesita un caudal de 2,29 m^3/h , lo que supone una reducción del 25% respecto del fluido base.

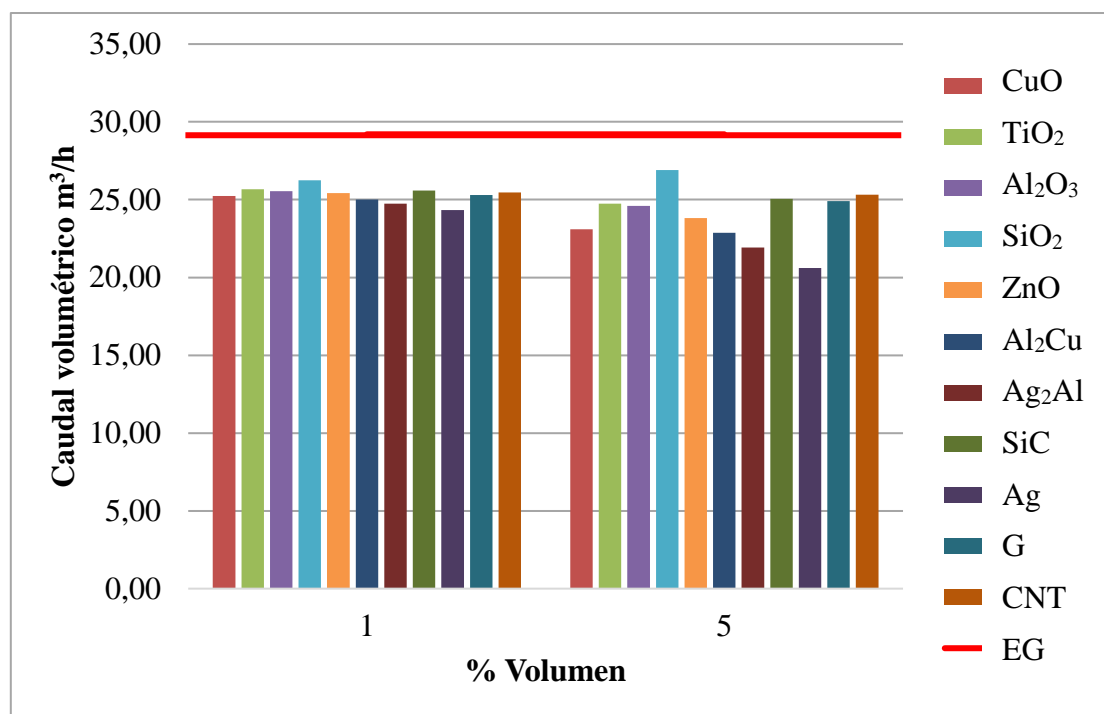


Figura 10. Caudal volumétrico necesario en función del nanofluido convencional en base etilenglicol utilizado.

En el caso de los nanofluidos convencionales con base EG, en la Figura 10 se observa que necesitan un mayor caudal que los nanofluidos convencionales en base agua. El nanofluido compuesto por Ag a una concentración de 5% volumen consigue 60kW con un caudal volumétrico de 20,61 m³/h mientras que con el uso del nanofluido compuesto por SiC se necesitaría un caudal de 27,91 m³/h. Por lo tanto, añadir un 5% en volumen de nanopartículas de Ag supone una reducción del caudal volumétrico del 29,42% mientras que la adición del 5% en volumen de nanopartículas de SiC reduce el caudal volumétrico necesario en un 4,42%

Analizando las Figuras 9 y 10 conjuntamente se obtiene que los nanofluidos mejoran el proceso con el aumento de la concentración a excepción de los nanofluidos compuestos a partir de Si con los cuales se necesitaría más caudal para mayores concentraciones aunque manteniéndose por debajo del caudal necesario para el fluido base. Si se compara por ejemplo el nanofluido de Ag₂Al a una concentración del 5% supone una mejora similar en ambos fluidos base. Reduce el caudal volumétrico un 25% en el caso de agua como fluido base y un 24,93% en el caso de EG como fluido base.

3.2.3.2 Nanofluidos híbridos

En este apartado se muestra el caudal volumétrico necesario para obtener 60kW de calor intercambiado con el uso de nanofluidos híbridos. En las Tablas 11 y 12 se recogen los valores de Re y G, obtenidos mediante las Ecuaciones 26 y 15, de los nanofluidos híbridos en base agua y EG respectivamente.

Tabla 11. Valores del número de Reynolds y flujo másico en función del nanofluido utilizado siendo estos híbridos y en base agua.

Fluido	% volumen	Re	G (kg/s/m ²)
Agua	-	1,56E+04	687,97
ND-CO ₃ O ₄	1	1,30E+04	617,23
	5	9,44E+03	661,60
ND-Fe ₃ O ₄	1	1,30E+04	616,39
	5	9,40E+03	658,48
ND-Ni	1	1,30E+04	616,40
	5	9,41E+03	659,35
Ag-MgO	1	1,32E+04	625,05
	5	9,85E+03	689,89
SiO ₂ -Cu	1	1,31E+04	623,09
	5	9,71E+03	680,47
Al ₂ O ₃ -Cu	1	1,32E+04	624,28
	5	9,80E+03	686,16
ZnO-Ag	1	1,32E+04	627,84
	5	1,00E+04	702,51
TiO ₂ -Ag	1	1,32E+04	626,29
	5	9,93E+03	695,31
Fe ₃ O ₄ -CNT	1	1,30E+04	616,07
	5	9,38E+03	657,36
Al ₂ O ₃ -CNT	1	1,29E+04	614,66
	5	9,28E+03	650,11
Al ₂ O ₃ -G	1	1,29E+04	611,36
	5	9,18E+03	643,09
Ag-G	1	1,30E+04	617,26
	5	9,58E+03	670,85
TiO ₂ -G	1	1,29E+04	611,67
	5	9,20E+03	644,55
SiO ₂ -CNT	1	1,29E+04	613,27
	5	9,18E+03	643,23
Ag-CNT	1	1,31E+04	620,24
	5	9,67E+03	677,62

En la Tabla 11 se observa cómo, al igual que con los nanofluidos convencionales, Re disminuye con el uso de los nanofluidos híbridos. Los valores de Re obtenidos son del orden de $1,3 \cdot 10^4$ para concentraciones de 1% volumen y de $9,5 \cdot 10^3$ para concentraciones de 5%, lo que indica que el aumento de la concentración de nanopartículas supone un descenso de Re. El flujo másico necesario, con el uso de los nanofluidos híbridos en base agua, para el proceso disminuye respecto del necesario con el uso del fluido base solo a excepción de los nanofluidos con concentraciones del 5% en volumen de Ag-MgO, ZnO-Ag y TiO₂-Ag que necesitan un flujo másico de 689,89 kg/s/m², 702,57 kg/s/m² y 695,31 kg/s/m² respectivamente. El menor flujo másico necesario se obtiene con el uso de Al₂O₃-G para una concentración del 1% (611,36 kg/s/m²).

De forma general, se necesita un flujo másico menor en el caso de concentraciones de 1% de nanopartículas en el fluido base, esto se debe a la menor densidad de los fluidos que contienen menor concentración de nanopartículas. Para poder realizar una comparación objetiva se necesita el caudal volumétrico el cual se muestra en la Figura 11.

Tabla 12. Valores del número de Reynolds y flujo másico en función del nanofluido utilizado siendo estos híbridos y en base etilenglicol.

Fluido	% Volumen	Re	G (kg/s/m ²)
EG	-	1,55E+04	7292,76
ND-Co ₃ O ₄	1	1,28E+04	6477,86
	5	9,17E+03	6835,55
ZnO-TiO ₂	1	1,31E+04	6608,29
	5	9,59E+03	7141,91
Fe ₃ O ₄ -CNT	1	1,28E+04	6464,38
	5	9,11E+03	6785,52
Al ₂ O ₃ -CNT	1	1,28E+04	6452,55
	5	9,02E+03	6724,06
SiO ₂ -CNT	1	1,28E+04	6441,47
	5	8,95E+03	6669,20
MgO-CNT	1	1,28E+04	6448,16
	5	9,00E+03	6702,74

Respecto al uso de nanofluidos híbridos e base EG, en la Tabla 12 se observa cómo, al igual que en el caso de los nanofluidos en base agua, Re disminuye con respecto al EG, siendo los valores de igual orden que los mostrados en la Tabla 11 para nanofluidos con base agua. Además, los valores de Re son del mismo orden que los obtenidos para los nanofluidos convencionales. Los flujos másicos necesarios para el proceso son del mismo orden que los necesarios utilizando nanofluidos convencionales con base EG y de un orden superior a los necesarios para el uso de nanofluidos, tanto convencionales como híbridos, con base agua. Esto se debe, como ya se mencionó en el apartado 3.2.3.1 *Nanofluidos convencionales*, a las diferencias en la conductividad térmica principalmente entre el agua y el EG.

Los caudales volumétricos calculados mediante la Ecuación 27 se representan en las Figuras 11 y 12 para los nanofluidos híbridos con base agua y EG respectivamente.

En la Figura 11 se muestra como el uso de los nanofluidos híbridos con base agua supone una disminución del orden de 0,5 m³/h del caudal necesario para una potencia de 60 kW en el proceso. Además, se tiene, al igual que con los nanofluidos convencionales que el aumento de la concentración disminuye los requerimientos de caudal necesario. Se observa que los nanofluidos que contienen Ag en el compuesto híbrido son los que menor caudal necesitan siendo ZnO-Ag con una concentración del 5% volumen el que menor caudal requiere, 2,29 m³/h, es decir, reduce el caudal en un 25%. Si se analizan los nanofluidos híbridos con los convencionales se obtiene que si por ejemplo se comparan los nanofluidos formados a partir de alumina se obtiene que el nanofluido híbrido Al₂O₃- Cu reduce el caudal volumétrico necesario un 22% mientras que el nanofluido convencional lo reduce un 15%. Sin embargo, la hibridación con

compuestos carbonosos no modifica el caudal necesario frente al convencional. Comparando el nanofluido de SiO_2 con los nanofluidos híbridos $\text{SiO}_2\text{-Cu}$, $\text{SiO}_2\text{-CNT}$ se observa que con los nanofluidos híbridos se reduce el caudal un 20% y un 12% respectivamente mientras que el nanofluido convencional reduce el caudal un 7%.

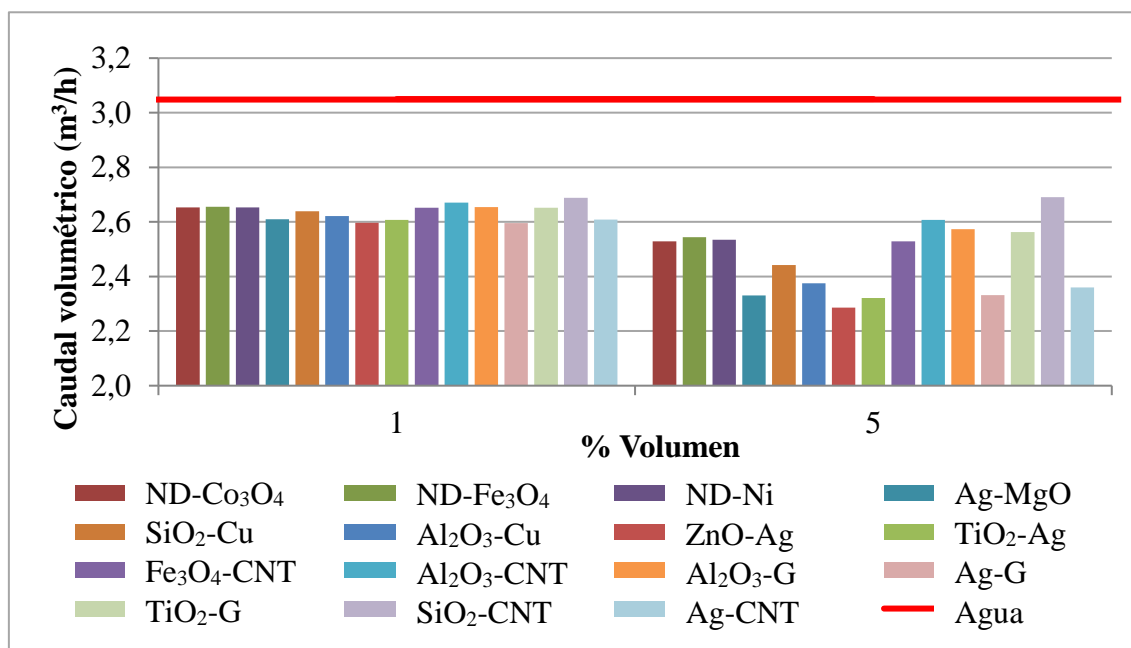


Figura 11. Caudal volumétrico necesario en función del nanofluido híbrido en base agua utilizado.

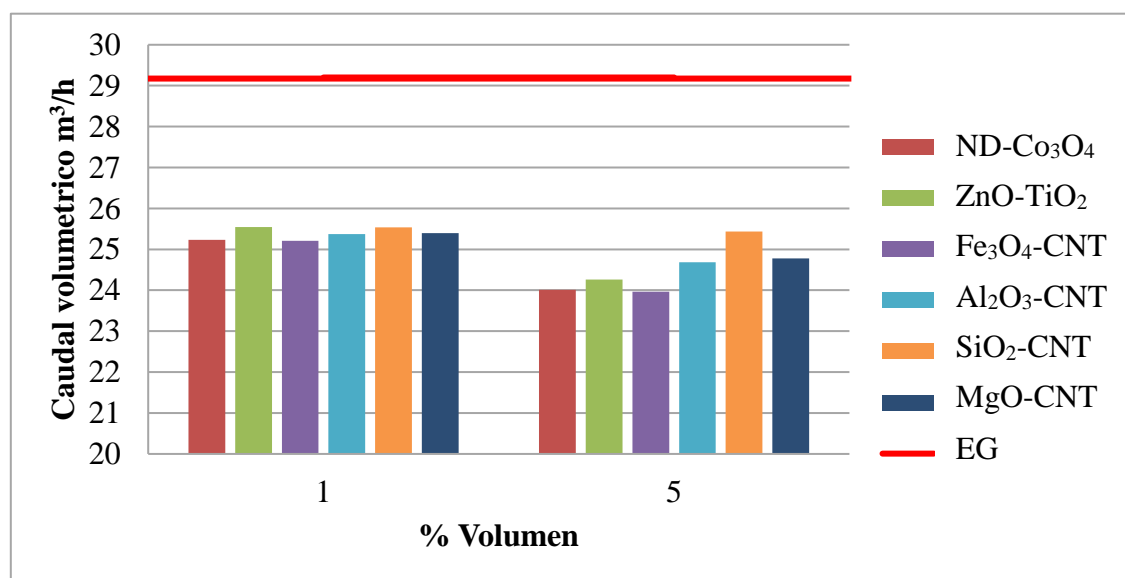


Figura 12. Caudal volumétrico necesario en función del nanofluido híbrido en base etilenglicol utilizado.

En la Figura 12 se muestra como el uso de los nanofluidos híbridos con base EG suponen una reducción del caudal necesario de alrededor de $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ siendo el ND- Co_3O_4 al 5% volumen el nanofluido que supone un menor caudal necesario, $24,0 \text{ m}^3/\text{h}$, frente a los $29,2 \text{ m}^3/\text{h}$ que se necesitan para el EG. Si se comparan los nanofluidos convencionales con los híbridos se tiene que por ejemplo en el caso del nanofluido

híbrido formado a partir de ZnO-TiO₂ se requiere un caudal de 24,26 m³/h un valor superior al necesario para el nanofluido convencional ZnO (23,82 m³/h) e inferior al necesario para el nanofluido convencional TiO₂ (24,75 m³/h).

Finalmente, analizando las Figuras 11 y 12 de forma conjunta se tiene que para la mayoría de los nanofluidos supone una mayor reducción del caudal volumétrico el aumento de la concentración independientemente de si son convencionales o híbridos y de si son en base agua o EG. Por ello, para la decisión final sería necesario evaluaciones adicionales ya que a pesar de que el uso de nanofluidos a mayor concentración supone una disminución de los requerimientos de caudal también supone un aumento del coste del fluido calefactor y además existe la posibilidad de deterioro del material. Actualmente, existen ya equipos realizados con titanio para evitar la corrosión provocada por los compuestos clorados utilizados en los procesos en piscinas.

Además, si se comparan los nanofluidos convencionales frente a los nanofluidos híbridos se tiene que los nanofluidos híbridos en base agua reducen el caudal volumétrico de media un 19,35% mientras que los nanofluidos convencionales en base agua reducen el caudal volumétrico un 15,74% para concentraciones del 5% en volumen de las diferentes nanopartículas analizadas. Para concentraciones del 1% en volumen la reducción de caudal volumétrico es inferior, siendo del 13,77% para los nanofluidos híbridos en base agua y del 12,46% para los nanofluidos convencionales en base agua.

En el caso de los nanofluidos en base EG analizados, tanto los nanofluidos híbridos como los convencionales reducen el caudal volumétrico un 16% de media para concentraciones del 5% en volumen de las diferentes nanopartículas. Para concentraciones del 1% en volumen de nanopartículas se obtiene una reducción del caudal volumétrico de un 13% de media.

3.2.4 Determinación de la caída de presión en el intercambiador de calor

Los costes de bombeo en el intercambiador están relacionados de forma directa con la caída de presión, es decir, una menor caída de presión implica un menor coste de bombeo del fluido. Por esto, se estudia la caída de presión en el lado de la carcasa y en el lado de los tubos para cuantificar el ahorro obtenido en función del nanofluido utilizado.

3.2.4.1 Caída de presión en el lado de la carcasa

La caída de presión en el lado de la carcasa se obtiene a partir de la Ecuación 29. Para ello se tiene que la velocidad en el lado de la carcasa (u_s) es de 5,8 m/s. A partir de la Figura 7, conociendo el valor de Re ($3,30 \cdot 10^4$) se obtiene un valor de j_f de $4,2 \cdot 10^{-2}$. Se obtiene una caída de presión de $4,16 \cdot 10^5$ Pa.

3.2.4.2 Caída de presión en el lado de los tubos

Es importante estimar la caída de presión en el lado de los tubos ya que es en este lado donde circulan los nanofluidos y de esta forma se podrá cuantificar el ahorro que supone el uso de los nanofluidos como fluido calefactor. La caída de presión en el lado de los tubos se obtiene a partir de la Ecuación 30. En este caso el factor de fricción varía, ya

que tenemos diferentes valores de Re . Dado que los valores de Re son prácticamente iguales para una concentración dada, se establece un valor de $j_f = 4,5 \cdot 10^{-3}$ para concentraciones de 1% vol y $j_f = 5 \cdot 10^{-3}$ para concentraciones de 5% vol. A continuación, se muestra la caída de presión para los nanofluidos convencionales y para los nanofluidos híbridos.

3.2.4.2.1 Caída de presión para los nanofluidos convencionales

La caída de presión depende, además de las propiedades de los fluidos, de la velocidad de estos por ello, a partir de la Ecuación 31, se obtiene la velocidad del nanofluido a través de los tubos. En las Tablas 13 y 14 se recogen las velocidades para los nanofluidos en base agua y EG respectivamente.

Tabla 13. Velocidades de los nanofluidos convencionales en base agua a través de los tubos.

Fluido	% Vol	u_t (m/s)
Agua		0,71
CuO	1	0,61
	5	0,56
TiO ₂	1	0,63
	5	0,60
Al ₂ O ₃	1	0,62
	5	0,60
SiO ₂	1	0,64
	5	0,66
ZnO	1	0,62
	5	0,58
Al ₂ Cu	1	0,61
	5	0,56
Ag ₂ Al	1	0,60
	5	0,53
MgO	1	0,62
	5	0,61
ND	1	0,62
	5	0,60
GO	1	0,62
	5	0,63
G	1	0,62
	5	0,61
CNT	1	0,62
	5	0,62

En la Tabla 13 se observa que, al igual que con el caudal volumétrico obtenido en el apartado 3.2.3 *Determinación del caudal volumétrico necesario en función del nanofluido utilizado*, la velocidad en el lado de los tubos disminuye con el uso de los nanofluidos y con la concentración de nanopartículas en estos. La velocidad para todos los nanofluidos es del orden de 0,6 m/s siendo la velocidad del nanofluido Ag₂Al la menor, 0,53 m/s.

Tabla 14. Velocidad de los nanofluidos en base etilenglicol a través de los tubos.

Fluido	% Vol	u_t (m/s)
EG		6,77
CuO	1	5,85
	5	5,36
TiO ₂	1	5,95
	5	5,74
Al ₂ O ₃	1	5,92
	5	5,70
SiO ₂	1	6,09
	5	6,23
ZnO	1	5,89
	5	5,52
Al ₂ Cu	1	5,80
	5	5,30
Ag ₂ Al	1	5,74
	5	5,08
SiC	1	6,06
	5	6,47
Ag	1	5,64
	5	4,78
G	1	5,86
	5	5,77
CNT	1	5,90
	5	5,87

Respecto a la velocidad necesaria con el uso de nanofluidos convencionales en base EG, en la Tabla 14 se observa que la velocidad necesaria es inferior a la necesaria para el fluido EG pero un orden de magnitud superior a la necesaria en el caso del fluido base agua o los nanofluidos convencionales en base agua. Esto, como ya se comentó en el análisis del flujo másico, es debido a la menor conductividad térmica del EG respecto al agua. En este caso, el nanofluido convencional Ag (5% vol) es el que menor velocidad presenta, 4,78 m/s.

En las Figuras 13 y 14 se recogen las caídas de presión para los nanofluidos en base agua y EG respectivamente.

En la Figura 13 se observa como el uso de nanofluidos disminuye la caída de presión lo que supone un menor coste de bombeo. En general, se obtiene una caída de presión inferior a concentraciones bajas, esto puede ser debido a que a concentraciones elevadas, la densidad y la viscosidad de los nanofluidos aumenta. Se puede ver como el nanofluido a partir de SiO₂ con una concentración del 5% volumen apenas disminuye la caída de presión un 3,86 % frente al agua. Sin embargo, el nanofluido Ag₂Al a una concentración de 1% vol disminuye la caída de presión un 22,65%.

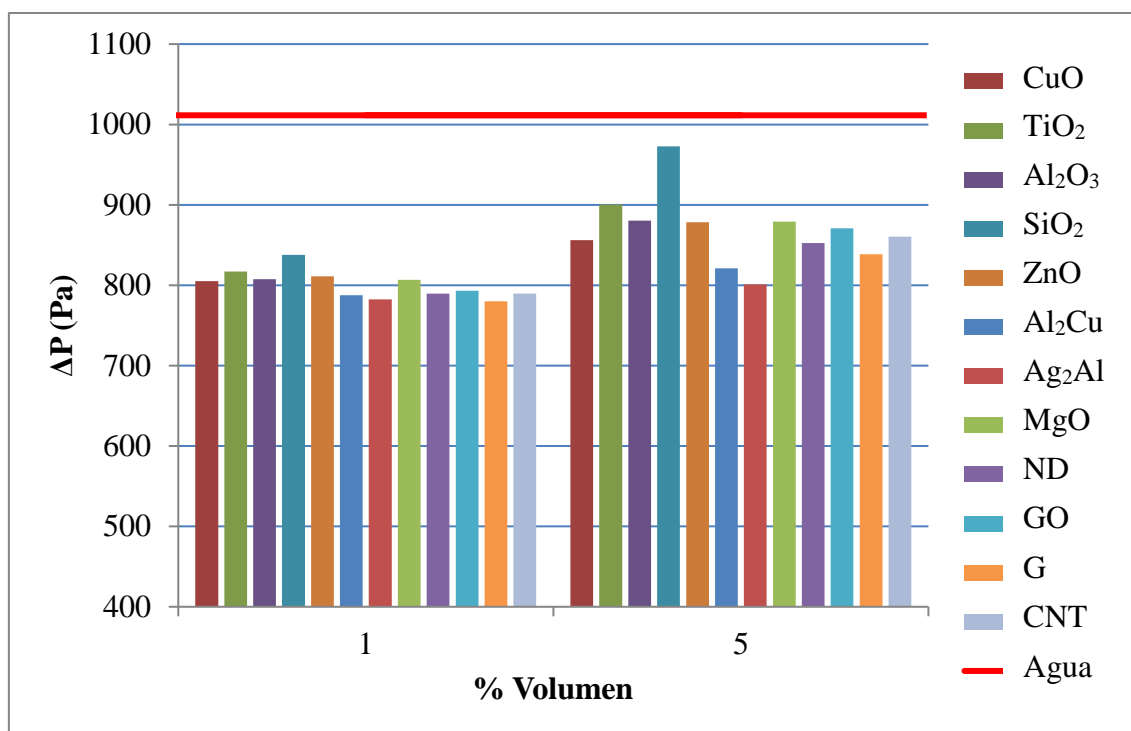


Figura 13. Caída de presión en el lado de los tubos con el uso de nanofluidos convencionales en base agua a diferentes concentraciones.

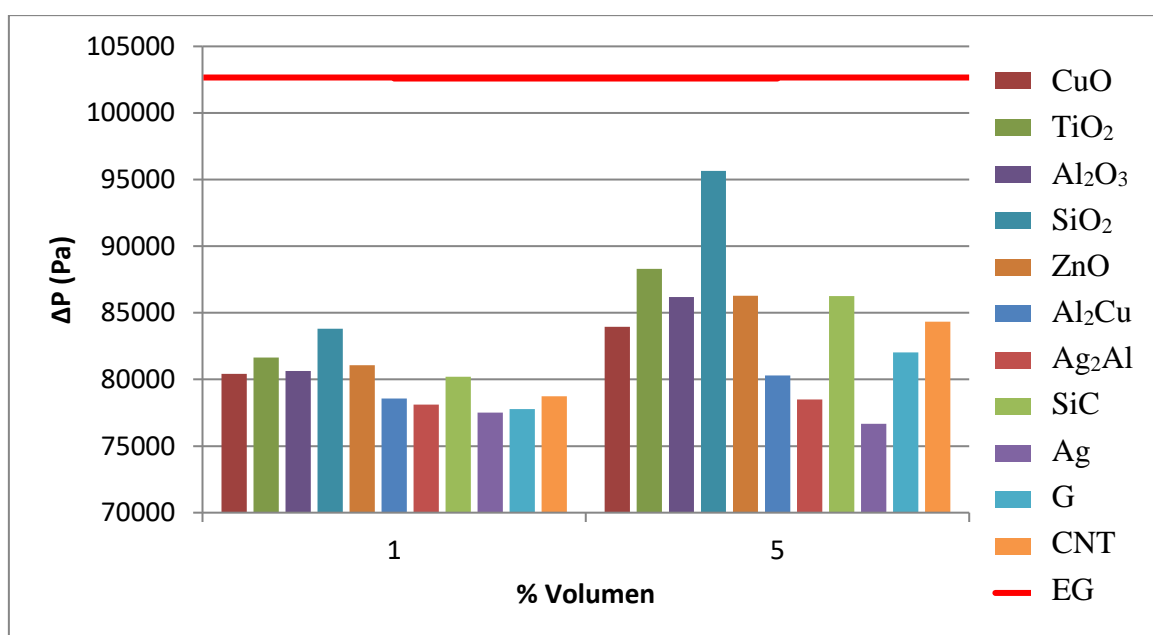


Figura 14. Caída de presión en el lado de los tubos con el uso de nanofluidos convencionales en base etilenglicol a diferentes concentraciones.

En la Figura 14 se observa cómo, al igual que con los nanofluidos en base agua, con el aumento de la concentración, la caída de presión es mayor aunque sin llegar a los valores de la caída de presión si se utiliza el fluido base EG. Como excepción, el nanofluido a partir de Ag tiene una caída de presión inferior para mayor concentración. Con el uso de este nanofluido la caída de presión disminuye un 25,28% frente al fluido base. Al igual que con agua como fluido base, el nanofluido a partir de SiO₂ al 5% vol

es el que menos disminuye la caída de presión. En este caso, la disminuye un 6,77 %, frente al 3.86% de descenso que provoca con agua como fluido base.

3.2.4.2.2 Caída de presión para los nanofluidos híbridos

A partir de la Ecuación 31 se obtiene la velocidad del nanofluido a través de los tubos. En las Tablas 15 y 16 se recogen las velocidades para los nanofluidos híbridos en base agua y EG respectivamente.

Tabla 15. Velocidad de los nanofluidos híbridos en base agua a través de los tubos.

Fluido	% Vol	u_t (m/s)
Agua		0,71
ND-Co ₃ O ₄	1	0,61
	5	0,59
ND-Fe ₃ O ₄	1	0,62
	5	0,59
ND-Ni	1	0,61
	5	0,59
Ag-MgO	1	0,60
	5	0,54
SiO ₂ -Cu	1	0,61
	5	0,57
Al ₂ O ₃ -Cu	1	0,61
	5	0,55
ZnO-Ag	1	0,60
	5	0,53
TiO ₂ -Ag	1	0,60
	5	0,54
Fe ₃ O ₄ -CNT	1	0,61
	5	0,59
Al ₂ O ₃ -CNT	1	0,62
	5	0,60
Al ₂ O ₃ -G	1	0,62
	5	0,60
Ag-G	1	0,60
	5	0,54
TiO ₂ -G	1	0,61
	5	0,59
SiO ₂ -CNT	1	0,62
	5	0,62
Ag-CNT	1	0,60
	5	0,55

Dado que la velocidad es proporcional al caudal, en la Tabla 15 se ve como la velocidad de los nanofluidos híbridos en base agua varían del mismo modo que el caudal analizado en la Figura 11. Los nanofluidos que presentan plata en el composite tienen

una menor velocidad, siendo el nanofluido a partir de ZnO-Ag al 5% vol el que menor velocidad necesita, 0,53 m/s, para obtener los 60kW de calor intercambiado.

Tabla 16. Velocidad de los nanofluidos híbridos en base etilenglicol a través de los tubos.

Fluido	% Vol	u_t (m/s)
EG		6,77
ND-Co ₃ O ₄	1	5,85
	5	5,56
ZnO-TiO ₂	1	5,92
	5	5,62
Fe ₃ O ₄ -CNT	1	5,84
	5	5,56
Al ₂ O ₃ -CNT	1	5,88
	5	5,72
SiO ₂ -CNT	1	5,92
	5	5,90
MgO-CNT	1	5,89
	5	5,74

En el caso de los nanofluidos híbridos en base EG, en la Tabla 16 se observa que ocurre lo mismo que con los nanofluidos convencionales, la velocidad disminuye con el aumento de la concentración pero se necesita una mayor velocidad que en el caso de los nanofluidos en base agua. Siendo los nanofluidos ND-Co₃O₄ y Fe₃O₄-CNT los fluidos que menor velocidad necesitan, 5,56 m/s, para conseguir los 60kW de calor intercambiado.

En las Figuras 15 y 16 se recoge la caída de presión en el lado de los tubos en función del nanofluido híbrido y de la concentración de este.

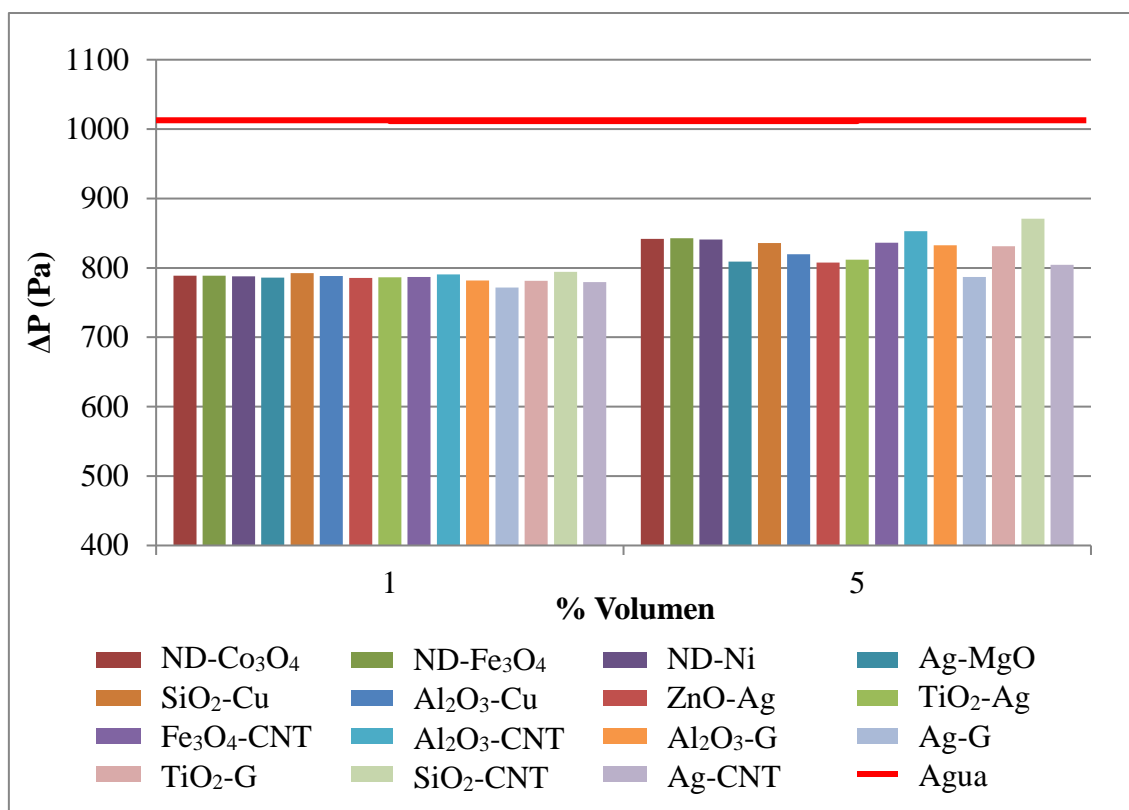


Figura 15. Caída de presión en el lado de los tubos con el uso de nanofluidos híbridos en base agua a diferentes concentraciones.

Si se analiza la Figura 15 se tiene que la caída de presión en el lado de los tubos desciende desde 1011,56 Pa para el caso del fluido base hasta un valor de 771,68 Pa para el caso del nanofluido híbrido Ag-G en base agua a una concentración de 1% en volumen, lo que supone una disminución de la caída de presión del 23,71% mientras que a concentraciones del 5% en volumen ese mismo nanofluido produce un descenso de la caída de presión del 22,19%. El compuesto que menor caída de presión produce es el nanofluido sintetizado con un 5% en volumen de SiO_2 -CNT que produce un descenso de la caída de presión del 13,92%. Si se analiza la tendencia de la caída de presión, se observa que se obtiene menor caída de presión a concentraciones más bajas, esto es debido a la menor densidad y viscosidad de los nanofluidos a concentraciones menores.

Si se compara la caída de presión provocada por los nanofluidos híbridos en base agua frente a la caída de presión provocada por los nanofluidos convencionales en base agua se tiene que por ejemplo, para nanofluidos de SiO_2 a una concentración de 1% en volumen disminuye la caída de presión un 17,16% mientras que si se utiliza el nanofluido híbrido SiO_2 -CNT, la caída de presión se reduce un 21,48%. En el caso de los nanofluidos a partir de ND, para concentraciones de 1% en volumen el descenso de la caída de presión es igual para el nanofluido convencional ND y para los nanofluidos híbridos ND- Co_3O_4 , ND- Fe_3O_4 y ND-Ni. Mientras que para concentraciones del 5% en volumen el nanofluido ND supone un descenso de la caída de presión del 15,73% mientras que los nanofluidos híbridos que contienen ND provocan un descenso de la caída de presión del 16,80% aproximadamente.

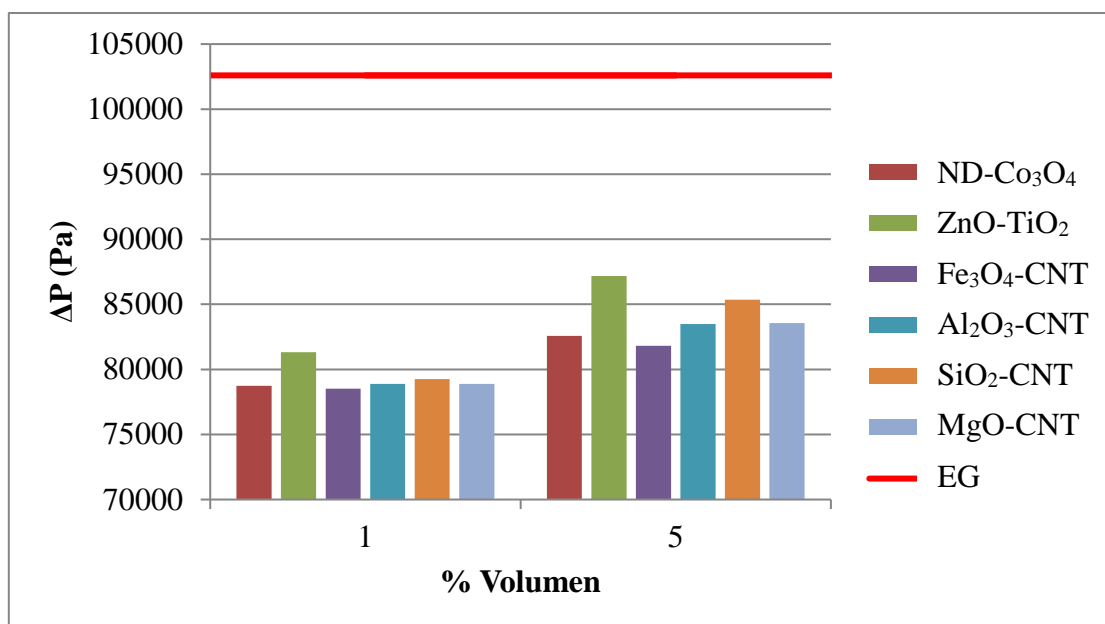


Figura 16. Caída de presión en el lado de los tubos con el uso de nanofluidos híbridos en base etilenglicol a diferentes concentraciones.

Referente a la caída de presión para nanofluidos híbridos en base EG mostrada en la Figura 16, se observa como al igual que para el resto de nanofluidos, una menor concentración de nanopartículas implica una menor caída de presión. El uso del nanofluido ND-Co₃O₄ supone una menor caída de presión, produciendo una reducción del 23,24% respecto al fluido base. Si se compara este nanofluido en base EG con el mismo nanofluido en base agua se obtiene que en base agua provoca un menor descenso de la caída de presión (22%) que en base EG.

Si se comparan los nanofluidos híbridos en base EG con los nanofluidos convencionales en base EG se tiene que para algunos nanofluidos como los sintetizados a partir de ZnO la caída de presión es similar para convencionales y los híbridos ya que para el nanofluido de ZnO al 1% en volumen la caída de presión desciende un 20,97% y para el nanofluido híbrido de ZnO-TiO₂ la caída de presión desciende un 20,72% respecto al fluido base mientras que para otros como los sintetizados a partir de SiO₂ la caída de presión es mayor para los convencionales. Los nanofluidos con un 1% en volumen de SiO₂ suponen un descenso de la caída de presión del 18,31% y los nanofluidos con un 1% en volumen de SiO₂-CNT suponen un descenso de la caída de presión del 22,75%.

Finalmente, analizando las Figuras 15 y 16 de forma conjunta se tiene que para la mayoría de los nanofluidos supone una mayor reducción de la caída de presión la menor concentración independientemente de si son convencionales o híbridos y de si son en base agua o EG. Debido a esto, se necesitarían consideraciones adicionales para decidir la concentración correcta ya que el caudal disminuye a concentraciones altas y la caída de presión disminuye a concentraciones bajas.

Además, si se comparan los nanofluidos convencionales frente a los nanofluidos híbridos se tiene que los nanofluidos híbridos en base agua reducen la caída de presión de media un 18,11% mientras que los nanofluidos convencionales en base agua reducen la caída de presión un 14,22% para concentraciones del 5% en volumen de las diferentes nanopartículas analizadas. Para concentraciones del 1% en volumen la

reducción de la caída de presión es superior, siendo del 22,29% para los nanofluidos híbridos en base agua y del 20,85% para los nanofluidos convencionales en base agua.

En el caso de los nanofluidos en base EG analizados, tanto los nanofluidos híbridos como los convencionales reducen la caída de presión un 18% de media para concentraciones del 5% en volumen de las diferentes nanopartículas. Para concentraciones del 1% en volumen de nanopartículas se obtiene una reducción de la caída de presión de un 22% de media.

Si se comparan los valores con otros sistemas encontrados en la literatura, se tiene que Jafari y col. (2017) obtuvieron una caída de presión de 1361 Pa para un intercambiador de 0,8m de largo y un diámetro interno de tubos de 8mm. Es decir, un 25,67% más que la caída de presión obtenida en el intercambiador de calor analizado siendo agua el fluido calefactor. La caída de presión en el intercambiador de calor diseñado por Jafari y col. (2017) es un 98% menor que en el intercambiador comercial con el uso de EG. Esto se debe a que el intercambiador estudiado está diseñado para la utilización de agua en lugar de EG como fluido calefactor.

4. CONCLUSIONS

Based on the hypothesis that the use of nanofluids instead of water or ethylene glycol as heating fluid in shell and tube heat exchangers can lead to energy savings, previous works about thermal conductivity enhancement and viscosity in fluids with addition of nanoparticles are analysed. The determination of flow rate and the pressure drop in a shell and tube heat exchanger for a certain application have been evaluated for nanofluids with several compositions. The main conclusions of study are:

- For the nanofluids thermal conductivity, viscosity and density increase compared with the base fluid and specific heat decreases.
- Over room temperature, the use of water based nanofluids is preferred to EG based nanofluids.
- The nanofluid that had the best results is the Ag₂Al water based nanofluid with 5% volume concentration which reduces the flow rate 25% and the pressure drop 20.7% compared with the base fluid.
- If it is necessary to use ethylene glycol based nanofluids, the best option is Ag with 5% volume concentration which reduces the flow rate 29.42% and the pressure drop 25.27% compared with the base fluid.
- The use of hybrid nanofluids require similar flow rates than the conventional nanofluids, but the synthesis is more expensive and difficult, so the use of conventional nanofluids is recommended.

5. NOMENCLATURA

A	Área total de transferencia de calor, m^2
A_s	Área de transferencia de calor en el lado de la carcasa, m^2
A_t	Área de transferencia de calor en el lado de los tubos, m^2
c_p	Calor específico del agua de la piscina, $J/kg/K$
c_{pbf}	Calor específico del fluido base, $J/kg/K$
c_{pnf}	Calor específico del nanofluido, $J/kg/K$
c_{pp}	Calor específico de la partícula, $J/kg/K$
d_{bf}	Diámetro equivalente de la molécula del fluido base, m
d_e	Diámetro equivalente de la carcasa, m
d_i	Diámetro interno de los tubos, m
d_o	Diámetro externo de los tubos, m
d_p	Diámetro de las partículas, m
d_s	Diámetro de la carcasa, m
F	Factor de corrección de la temperatura
G	Flujo másico en el lado de los tubos, $kg/s/m^2$
G_s	Flujo másico en el lado de la carcasa, $kg/s/m^2$
h_i	Coefficiente de transferencia de calor en el lado de los tubos, $W/m^2/^\circ C$
h_s	Coefficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa, $W/m^2/^\circ C$
j_f	Factor de fricción
j_h	Factor de transferencia de calor
k	Conductividad térmica del material, $W/m/K$
k_b	Constante de Boltzmann
k_{bf}	Conductividad térmica del fluido base, $W/m/K$
k_{eff}	Conductividad térmica del nanofluido, $W/m/K$
k_f	Conductividad térmica del agua de la piscina, $W/m/K$
k_p	Conductividad térmica de la partícula, $W/m/K$
L	Longitud de los tubos, m
l_b	Espacio del deflector de la carcasa, m

M	Peso molecular, kg/mol
\dot{m}_s	Caudal másico en el lado de la carcasa, kg/s
N	Número de Avogadro
N_p	Número de pasos por los tubos
Nu	Número de Nusselt
N_t	Número de tubos
Pr	Número de Prandtl
P_t	Distancia entre los centros de los tubos, m
Q	Calor total intercambiado, kW
$q_{\text{agua piscina}}$	Caudal volumétrico del agua de la piscina, m ³ /h
$q_{\text{calefactor}}$	Caudal volumétrico del fluido calefactor, m ³ /h
R	Factor para el cálculo de F
Re	Número de Reynolds
r_i	Radio interno de los tubos, m
r_o	Radio externo de los tubos, m
S	Factor para el cálculo de F
T_{c1}	Temperatura de entrada del fluido frío, °C
T_{c2}	Temperatura de salida del fluido frío, °C
T_{fr}	Temperatura del punto de fusión del fluido base, °C
T_{h1}	Temperatura de entrada del fluido caliente, °C
T_{h2}	Temperatura de salida del fluido caliente, °C
U	Coeficiente global de transferencia de calor, W/m ² /K
u_s	Velocidad del fluido en el lado de la carcasa, m/s
u_t	Velocidad del fluido en el lado de los tubos, m/s
ΔP_s	Caída de presión en el lado de la carcasa, Pa
ΔP_t	Caída de presión en el lado de los tubos, Pa
ΔT_{lmtd}	Temperatura media logarítmica corregida, °C
ΔT_m	Temperatura media logarítmica, °C

Símbolos griegos

μ	Viscosidad del agua de piscina, Pa·s
μ_{bf}	Viscosidad del fluido base, Pa·s
μ_{eff}	Viscosidad del nanofluido, Pa·s
ρ	Densidad del agua de piscina, kg/m ³
ρ_{bf}	Densidad del fluido base, kg/m ³
ρ_{nf}	Densidad del nanofluido, kg/m ³
ρ_p	Densidad de la partícula, kg/m ³
ϕ	Fracción volumétrica de partícula presente en el nanofluido

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi, S. M., Rashidi, A., Nemati, A., y Arzani, K. (2013). The effect of functionalisation method on the stability and the thermal conductivity of nanofluid hybrids of carbon nanotubes/gamma alumina. *Ceramics International*, 39, 3885-3891.
- Afrand, M. (2017). Experimental study on thermal conductivity of ethylene glycol containing hybrid nano-additives and development of a new correlation. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1111-1119.
- Agarwal, R., Verma, K., Agrawal, N. K., Duchaniya, R. K., y Singh, R. (2016). Synthesis, characterization, thermal conductivity and sensitivity of CuO nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 102, 1024-1036.
- Ahammed, N., Asirvatham, L. G., y Wongwises, S. (2016). Entropy generation analysis of graphene–alumina hybrid nanofluid in multiport minichannel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 1084-1097.
- Akilu, S., Baheta, A. T., Minea, A. A., y Sharma, K. V. (2017). Rheology and thermal conductivity of non-porous silica (SiO₂) in viscous glycerol and ethylene glycol based nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, 245-253.
- Alawi, O. A., Sidik, N. A. C., Xian, H. W., Kean, T. H., y Kazi, S. N. (2018). Thermal conductivity and viscosity models of metallic oxides nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 1314-1325.
- Ali, F. M., y Mahmood Mat Yunus, W. (2013). Study of the effect of particles size and volume fraction concentration on thermal conductivity and thermal diffusivity of Al₂O₃ nanofluids. *International Journal of Physical Sciences*, 8, 1442-1457.
- Amiri, M., Movahedirad, S., y Manteghi, F. (2016). Thermal conductivity of water and ethylene glycol nanofluids containing new modified surface SiO₂-Cu nanoparticles: Experimental and modeling. *Applied Thermal Engineering*, 108, 48-53.
- Baghbanzadeh, M., Rashidi, A., Rashtchian, D., Lotfi, R., y Amrollahi, A. (2012). Synthesis of spherical silica/multiwall carbon nanotubes hybrid nanostructures and investigation of thermal conductivity of related nanofluids. *Thermochimica Acta*, 549, 87-94.
- Baheta, A. T., y Woldeyohannes, A. D. (2013). Effect of particle size on effective thermal conductivity of nanofluids. *Asian Journal of Scientific Research*, 6, 339-345.
- Batmunkh, M., Tanshen, M. R., Nine, M. J., Myekhlai, M., Choi, H., Chung, H., y Jeong, H. (2014). Thermal conductivity of TiO₂ nanoparticles based aqueous nanofluids with an addition of a modified silver particle. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53, 8445-8451.

- Bubbico, R., Celata, G. P., D'Annibale, F., Mazzarotta, B., y Menale, C. (2015). Experimental analysis of corrosion and erosion phenomena on metal surfaces by nanofluids. *Chemical Engineering Research and Design*, 104, 605-614.
- Bundschuh, M., Filser, J., Lüderwald, S., McKee, M. S., Metreveli, G., Schaumann, G. E., ... Wagner, S. (2018). Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to? *Environmental Sciences Europe*, 30.
- Bystrzejewska-Piotrowska, G., Golimowski, J., y Urban, P. L. (2009). Nanoparticles: Their potential toxicity, waste and environmental management. *Waste Management*, 29, 2587-2595.
- Celata, G. P., D'Annibale, F., Mariani, A., Sau, S., Serra, E., Bubbico, R., ... Poth, H. (2014). Experimental results of nanofluids flow effects on metal surfaces. *Chemical Engineering Research and Design*, 92, 1616-1628.
- Chandrasekar, M., Suresh, S., y Chandra Bose, A. (2010). Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al_2O_3 /water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, 210-216.
- Chen, G., Yu, W., Singh, D., Cookson, D., y Roubort, J. (2008). Application of SAXS to the study of particle-size-dependent thermal conductivity in silica nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 10, 1109-1114.
- Chopkar, M., Sudarshan, S., Das, P. K., y Manna, I. (2008). Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluid. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39, 1535-1542.
- Corcione, M. (2011). Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 52, 789-793.
- Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P., y Roetzel, W. (2003). Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 125, 567.
- Devendiran, D. K., y Amirtham, V. A. (2016). A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 21-40.
- Esfahani, M. R., Languri, E. M., y Nunna, M. R. (2016). Effect of particle size and viscosity on thermal conductivity enhancement of graphene oxide nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 308-315.
- Esfahani, N. N., Toghraie, D., y Afrand, M. (2018). A new correlation for predicting the thermal conductivity of ZnO-Ag (50%-50%)/water hybrid nanofluid: An experimental study. *Powder Technology*, 323, 367-373.
- Esfe, M. H., Rejvani, M., Karimpour, R., y Abbasian Arani, A. A. (2017). Estimation of thermal conductivity of ethylene glycol-based nanofluid with hybrid suspensions of SWCNT- Al_2O_3 nanoparticles by correlation and ANN methods using experimental data. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 128, 1359-1371.

- Farbod, M., y Ahangarpour, A. (2016). Improved thermal conductivity of Ag decorated carbon nanotubes water based nanofluids. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, 380, 4044-4048.
- Glycols, E. (s. f.). GLYCOLS, 12, 644-682.
- Guo, W., Li, G., Zheng, Y., y Dong, C. (2018). Measurement of the thermal conductivity of SiO₂nanofluids with an optimized transient hot wire method. *Thermochimica Acta*, 661, 84-97.
- Hasanpour, A., Farhadi, M., y Sedighi, K. (2014). A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 55, 53-62.
- Hemmat Esfe, M., Abbasian Arani, A. A., Rezaie, M., Yan, W. M., y Karimipour, A. (2015). Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag-MgO/water hybrid nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 66, 189-195.
- Hemmat Esfe, M., Abbasian Arani, A. A., Shafiei Badi, R., y Rejvani, M. (2018). ANN modeling, cost performance and sensitivity analyzing of thermal conductivity of DWCNT–SiO₂/EG hybrid nanofluid for higher heat transfer: An experimental study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131, 2381-2393.
- Hemmat Esfe, M., Alirezaie, A., y Rejvani, M. (2017). An applicable study on the thermal conductivity of SWCNT-MgO hybrid nanofluid and price-performance analysis for energy management. *Applied Thermal Engineering*, 111, 1202-1210.
- Hemmat Esfe, M., Firouzi, M., y Afrand, M. (2018). Experimental and theoretical investigation of thermal conductivity of ethylene glycol containing functionalized single walled carbon nanotubes. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 95, 71-77.
- Hemmat Esfe, M., y Saedodin, S. (2015). Turbulent forced convection heat transfer and thermophysical properties of MgO-water nanofluid with consideration of different nanoparticles diameter, an empirical study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119, 1205-1213.
- Hemmat Esfe, M., Saedodin, S., Biglari, M., y Rostamian, H. (2015). Experimental investigation of thermal conductivity of CNTs-Al₂O₃/water: A statistical approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 69, 29-33.
- Huminic, G., y Huminic, A. (2018). Hybrid nanofluids for heat transfer applications – A state-of-the-art review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 82-103.
- Issa, R. J. (2016). Effect of Nanoparticles Size and Concentration on Thermal and Rheological Properties of AL₂O₃-Water Nanofluids, 1-7.
- Jafari, S. M., Saramnejad, F., y Dehnad, D. (2018). Designing and application of a shell and tube heat exchanger for nanofluid thermal processing of liquid food products. *Journal of Food Process Engineering*, 41.

- Jiang, H., Zhang, Q., y Shi, L. (2015). Effective thermal conductivity of carbon nanotube-based nanofluid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 55, 76-81.
- Kim, S. H., Choi, S. R., y Kim, D. (2007). Thermal Conductivity of Metal-Oxide Nanofluids: Particle Size Dependence and Effect of Laser Irradiation. *Journal of Heat Transfer*, 129, 298.
- Kumar, N., y Sonawane, S. S. (2016). Experimental study of thermal conductivity and convective heat transfer enhancement using CuO and TiO₂ nanoparticles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 98-107.
- Kumar, N., Sonawane, S. S., y Sonawane, S. H. (2018). Experimental study of thermal conductivity, heat transfer and friction factor of Al₂O₃ based nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 90, 1-10.
- Kwek, D., Crivoi, A., y Duan, F. (2010). Effects of temperature and particle size on the thermal property measurements of Al₂O₃ - Water nanofluids. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 55, 5690-5695.
- Lee, J. H., Lee, S. H., y Pil Jang, S. (2014). Do temperature and nanoparticle size affect the thermal conductivity of alumina nanofluids? *Applied Physics Letters*, 104.
- Lee, S., Choi, S. U.-S., Li, S., y Eastman, J. A. (1999). Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. *Journal of Heat Transfer*, 121, 280.
- Li, C. H., y Peterson, G. P. (2007). The effect of particle size on the effective thermal conductivity of Al₂O₃-water nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 101, 044312.
- Li, X., Zou, C., Lei, X., y Li, W. (2015). Stability and enhanced thermal conductivity of ethylene glycol-based SiC nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 613-619.
- Maheshwary, P. B., Handa, C. C., y Nemade, K. R. (2017). A comprehensive study of effect of concentration, particle size and particle shape on thermal conductivity of titania/water based nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 119, 79-88.
- Minea, A. A. (2017). Challenges in hybrid nanofluids behavior in turbulent flow: Recent research and numerical comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 426-434.
- Missaoui, W. N., Arnold, R. D., y Cummings, B. S. (2018). Toxicological status of nanoparticles: What we know and what we don't know. *Chemico-Biological Interactions*, 295, 1-12.
- Munkhbayar, B., Tanshen, M. R., Jeoun, J., Chung, H., y Jeong, H. (2013). Surfactant-free dispersion of silver nanoparticles into MWCNT-aqueous nanofluids prepared by one-step technique and their thermal characteristics. *Ceramics International*, 39, 6415-6425.
- Murshed, S. M. S., Leong, K. C., y Yang, C. (2005). Enhanced thermal conductivity of

- TiO₂ - Water based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 44, 367-373.
- Nine, M. J., Batmunkh, M., Kim, J.-H., Chung, H.-S., y Jeong, H.-M. (2012). Investigation of Al₂O₃-MWCNTs Hybrid Dispersion in Water and Their Thermal Characterization. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12, 4553-4559.
- Poling, B. E., Thomson, G. H., Friend, D. G., Rowley, R. L., y Wilding, V. W. (2008). Physical and chemical data. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 2-517.
- Products, P. P. (s. f.). swimming pool HEAT EXCHANGERS AIC.
- Ranjbarzadeh, R., Meghdadi Isfahani, A. H., Afrand, M., Karimipour, A., y Hojaji, M. (2017). An experimental study on heat transfer and pressure drop of water/graphene oxide nanofluid in a copper tube under air cross-flow: Applicable as a heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 125, 69-79.
- Sajid, M. U., y Ali, H. M. (2018). Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A critical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 211-234.
- Sarbolookzadeh Harandi, S., Karimipour, A., Afrand, M., Akbari, M., y D'Orazio, A. (2016). An experimental study on thermal conductivity of F-MWCNTs-Fe₃O₄/EG hybrid nanofluid: Effects of temperature and concentration. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 171-177.
- Selvam, C., Lal, D. M., y Harish, S. (2016). Thermal conductivity enhancement of ethylene glycol and water with graphene nanoplatelets. *Thermochimica Acta*, 642, 32-38.
- Seong, H., Kim, G., Jeon, J., Jeong, H., Noh, J., Kim, Y., ... Huh, S. (2018). Experimental Study on Characteristics of Grinded Graphene Nanofluids with Surfactants. *Materials*, 11, 1-8.
- Sezer, N., Atieh, M. A., y Koc, M. (2018). A comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids. *Powder Technology*, 344, 404-431.
- Shahsavar, A., Salimpour, M. R., Saghafian, M., y Shafii, M. B. (2016). Effect of magnetic field on thermal conductivity and viscosity of a magnetic nanofluid loaded with carbon nanotubes. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30, 809-815.
- Shahsavar, A., Salimpour, M., Saghafian, M., y Shafii, M. (2015). An experimental study on the effect of ultrasonication on thermal conductivity of ferrofluid loaded with carbon nanotubes. *Thermochimica Acta*, 617, 102-110.
- Shamaeil, M., Firouzi, M., y Fakhar, A. (2016). The effects of temperature and volume fraction on the thermal conductivity of functionalized DWCNTs/ethylene glycol nanofluid: An experimental study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 126, 1455-1462.
- Singh, A., Tescari, S., Lantin, G., Agrafiotis, C., Roeb, M., y Sattler, C. (2017). Solar

- thermochemical heat storage via the $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CoO}$ looping cycle: Storage reactor modelling and experimental validation. *Solar Energy*, 144, 453-465.
- Sinnott, R. K., Coulson, J. M., y Richardson, J. F. (2005). *Coulson & Richardson's chemical engineering: Vol. 6: Chemical engineering design* (4th ed). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Sundar, L. S., Hortiguera, M. J., Singh, M. K., y Sousa, A. C. M. (2016). Thermal conductivity and viscosity of water based nanodiamond (ND) nanofluids: An experimental study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 245-255.
- Sundar, L. S., Irurueta, G. O., Venkata Ramana, E., Singh, M. K., y Sousa, A. C. M. (2016). Thermal conductivity and viscosity of hybrid nanofluids prepared with magnetic nanodiamond-cobalt oxide ($\text{ND-Co}_3\text{O}_4$) nanocomposite. *Case Studies in Thermal Engineering*, 7, 66-77.
- Sundar, L. S., Singh, M. K., y Sousa, A. C. M. (2014). Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT- Fe_3O_4 /water hybrid nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 52, 73-83.
- Sundar, L. S., Venkata Ramana, E., Graça, M. P. F., Singh, M. K., y Sousa, A. C. M. (2016). Nanodiamond- Fe_3O_4 nanofluids: Preparation and measurement of viscosity, electrical and thermal conductivities. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 73, 62-74.
- Suresh, S., Venkataraj, K. P., Selvakumar, P., y Chandrasekar, M. (2011). Synthesis of Al_2O_3 -Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 388, 41-48.
- Syam Sundar, L., Singh, M. K., Ferro, M. C., y Sousa, A. C. M. (2017). Experimental investigation of the thermal transport properties of graphene oxide/ Co_3O_4 hybrid nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 84, 1-10.
- Syam Sundar, L., Singh, M. K., y Sousa, A. C. M. (2018). Heat transfer and friction factor of nanodiamond-nickel hybrid nanofluids flow in a tube with longitudinal strip inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 390-401.
- Tawfik, M. M. (2017). Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1239-1253.
- Teng, T. P., Hung, Y. H., Teng, T. C., Mo, H. E., y Hsu, H. G. (2010). The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 30, 2213-2218.
- Timofeeva, E. V., Gavrilov, A. N., McCloskey, J. M., Tolmachev, Y. V., Sprunt, S., Lopatina, L. M., y Selinger, J. V. (2007). Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: Experiment and theory. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 76, 28-39.

- Toghraie, D., Chaharsoghi, V. A., y Afrand, M. (2016). Measurement of thermal conductivity of ZnO–TiO₂/EG hybrid nanofluid: Effects of temperature and nanoparticles concentration. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 125, 527-535.
- Vahdat Azad, A., y Vahdat Azad, N. (2016). Application of nanofluids for the optimal design of shell and tube heat exchangers using genetic algorithm. *Case Studies in Thermal Engineering*, 8, 198-206.
- Wang, S., Li, Y., Zhang, H., Lin, Y., Li, Z., Wang, W., ... Zhi, C. (2016). Enhancement of thermal conductivity in water-based nanofluids employing TiO₂ / reduced graphene oxide composites. *Journal of Materials Science*, 51, 10104-10115.
- Yarmand, H., Gharehkhani, S., Ahmadi, G., Shirazi, S. F. S., Baradaran, S., Montazer, E., ... Dahari, M. (2015). Graphene nanoplatelets-silver hybrid nanofluids for enhanced heat transfer. *Energy Conversion and Management*, 100, 419-428.
- Yarmand, H., Gharehkhani, S., Shirazi, S. F. S., Goodarzi, M., Amiri, A., Sarsam, W. S., ... Kazi, S. N. (2016). Study of synthesis, stability and thermo-physical properties of graphene nanoplatelet/platinum hybrid nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 77, 15-21.
- Zaman, A., Ali, N., y Sajjad, M. (2019). Effects of nanoparticles (Cu, TiO₂, Al₂O₃) on unsteady blood flow through a curved overlapping stenosed channel. *Mathematics and Computers in Simulation*, 156, 279-293.
- Zhang, H., Wang, S., Lin, Y., Feng, M., y Wu, Q. (2017). Stability, thermal conductivity, and rheological properties of controlled reduced graphene oxide dispersed nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 119, 132-139.

<https://www.todopiscinas.es/dimensiones-de-piscinas/> (Visitado 18 diciembre 2018)

<https://accuratus.com/silicar.html> (Visitado 15 enero 2019)

7. ANEXOS

7.1 ANEXO I

Tabla A.I. Nanofluidos convencionales siendo agua el fluido base

Nanofluido	T (°C)	% vol	% Mejora k	% Aumento μ	Referencia
CuO	30	0,01-0,06	1,0-25,0	n. d.	(Kumar y Sonawane, 2016)
CuO	27	1-5	10,0-50,0	10,0-100,0	(Alawi y col., 2018)
	37	1-5	13,0-27,0	Ratio 0,8-1,4	
	47	1-5	16,0-31,0	Ratio 0,6-1,2	
CuO	20	2	19,0	n. d.	(Agarwal y col., 2016)
	30		19,0		
	40		19,0		
	50		21,0		
CuO	ambiente	1-3,5	4,0-12,0	n. d.	(S. Lee y col., 1999)
TiO ₂	30	0,01-0,06	0,0-16,0	n. d.	(Kumar y Sonawane, 2016)
TiO ₂ *	30	0,5-2,5	14,3-55,7	n. d.	(Maheshwary y col., 2017)
	60	0,5-2,5	34,7-93,3	n. d.	
TiO ₂	20	1-3	2,8-8,7	n. d.	(Kim y col., 2007)
TiO ₂	ambiente	1-5	18,5-30,0	n. d.	(Murshed y col., 2005)
Al ₂ O ₃	30	0,01-0,08	1,1-6,5	n. d.	(Kumar y col., 2018)
Al ₂ O ₃	28	0,5-6	2,9-10,9	n. d.	(C. H. Li y Peterson, 2007)
	35	0,5-6	3,4-26,0		
Al ₂ O ₃ *	21.8	5-20	3,6-30,4	n. d.	(Issa, 2016)
	46.5	5-20	4,9-38,6	n. d.	
Al ₂ O ₃	23	2-10	4,7-19,7	0,0-120,0	(Timofeeva y col., 2007)
Al ₂ O ₃	15	1-5	1,7-15,0	60,0 a 25°C	(Kwek y col., 2010)
	55	1-5	16,0-34,0		
Al ₂ O ₃	20	0,3-3	1,0-8,0	n. d.	(Kim y col., 2007)
Al ₂ O ₃	20-60	0,5	2,5-4,5	n. d.	(J. H. Lee y col., 2014)
Al ₂ O ₃		0,2-1,4	4,7-9,5	n. d.	(Ali y Mahmood Mat Yunus, 2013)

Tabla A.I. Nanofluidos convencionales siendo agua el fluido base (Continuación)

Nanofluido	T (°C)	% vol	% Mejora k	% Aumento μ	Referencia
Al ₂ O ₃	21	1-4	2,5-9,0	n. d.	(Das y col., 2003)
	36	1-4	6,5-16,0		
	51	1-4	11,0-20,0		
Al ₂ O ₃	ambiente	0,3-3	1,6-9,7	10,0-120,0	(Chandrasekar y col., 2010)
Al ₂ O ₃	27	1-5	10,0-23,0	10,0-100,0	(Alawi y col., 2018)
	37	1-5	15,0-27,0	Ratio 0,8-1,4	
	47	1-5	17,0-30,0	Ratio 0,6-1,2	
Al ₂ O ₃	ambiente	1-4	2,0-10,0	n. d.	(S. Lee y col., 1999)
Al ₂ O ₃	30	0.5-2	5,0-13,0	n. d.	(Teng y col., 2010)
SiO ₂	ambiente	16	17,0	n. d.	(Chen y col., 2008)
SiO ₂	27	1-5	3,5-6,0	10,0-100,0	(Alawi y col., 2018)
	37	1-5	4,5-6,3	Ratio 0,8-1,4	
	47	1-5	5,3-6,3	Ratio 0,6-1,2	
SiO ₂	20	0.5-1	1,0-3,5	n. d.	(Guo y col., 2018)
ZnO	20	1-3	1,8-7,3	n. d.	(Kim y col., 2007)
ZnO	27	1-5	9,0-20,0	10,0-100,0	(Alawi y col., 2018)
	37	1-5	12,0-23,0	Ratio 0,8-1,4	
	47	1-5	15,0-26,0	Ratio 0,6-1,2	
Al ₂ Cu	27	1-2	40,0-78,0	n. d.	(Chopkar y col., 2008)
Ag ₂ Al	27	1-2	40,0-90,0	n. d.	
MgO		0,005-0,02	4,0-23,0	n. d.	(Hemmat Esfe y Saedodin, 2015)
ND	20	0,2-1	4,8-12,8	41,0-57,3	(Sundar, Hortiguera, y col., 2016)
	30	0,2-1	6,6-15,1	24,1-60,3	
	40	0,2-1	7,3-17,4	16,7-43,8	
	50	0,2-1	7,9-19,1	30,0-73,3	
	60	0,2-1	9,0-22,8	45,8-79,2	

n.d : no disponible

Tabla A.II. Nanofluidos híbridos siendo el agua el fluido base

Nanofluido	T (°C)	% vol	% Mejora k	% aumento μ	Referencia
ND-CO ₃ O ₄	20	0,05-0,15	3,0-8,0	6,3-3,5	(Sundar, Irurueta, y col., 2016)
	40	0,05-0,15	3,0-12,0	4,2-20,8	
	60	0,05-0,15	6,0-16,0	13,0-52,2	
ND-Fe ₃ O ₄	20	0,05-0,20	2,3-9,2	50,0-57,5	(Sundar, Venkata Ramana, y col., 2016)
	40	0,05-0,20	2,8-11,5	20,8-35,4	
	60	0,05-0,20	4,8-17,8	56,5-78,3	
ND-Ni	30	0,1-0,3	8,4-10,2	11,9-16,7	(Syam Sundar y col., 2018)
	40	0,1-0,3	13,2-16,4	12,6-20,2	
	50	0,1-0,3	17,9-23,3	9,3-19,9	
Ag-MgO		0,005-0,02	4,7-15,8	6,1-38,1	(Hemmat Esfe, Abbasian Arani, y col., 2015)
SiO ₂ -Cu *	20	0,5-1,0	7,0-8,7	n. d.	(Amiri y col., 2016)
	30	0,5-1,0	11,0-12,7		
	40	0,5-1,0	14,3-15,9		
Al ₂ O ₃ -Cu	ambiente	0,1-2,0	1,5-12,1	8,0-115,0	(Suresh y col., 2011)
ZnO-Ag	30	0,125-2,0	2,4-12,5	n. d.	(N. N. Esfahani y col., 2018)
	40	0,125-2,0	3,0-19,5		
	50	0,125-2,0	4,4-25,6		
TiO ₂ -Ag *	20	1-3	3,2-3,4	n. d.	(Batmunkh y col., 2014)
	30	1-3	2,3-3,0		
	40	1-3	1,4-1,9		

* La concentración dada en % en peso

Tabla A.III. Nanofluidos convencionales a partir de materiales carbonosos siendo el agua el fluido base.

Nanofluido	T (°C)	% vol	% Mejora k	% aumento μ	Referencia
rGO	20	0,02-0,1	2,0-12,5	136,4-354,5	(Zhang y col., 2017)
	40	0,02-0,1	2,0-18,5	12,5-212,5	
	60	0,02-0,1	4,9-32,2	4,2-4,8	
GO *	25	0,01-0,5	8,7-19,9	40,0-1300,0	(M. R. Esfahani y col., 2016)
	40	0,01-0,5	0,0-20,0	-16,6-1233,0	
	60	0,01-0,5	0,0-50,0	-75,0-1400,0	
GnP	30	0,1-0,5	2,9-16,0	n. d.	(Selvam y col., 2016)
CNT	30	0,2-1,0	6,3-13,5	n. d.	(Jiang y col., 2015)
	40	0,2-1,0	6,5-13,8		
	60	0,2-1,0	6,5-13,5		

Tabla A.IV. Nanofluidos híbridos a partir de materiales carbonosos siendo el agua el fluido base.

Nanofluido	T (°C)	% vol	% Mejora k	% aumento μ	Referencia
Fe ₃ O ₄ -CNT	30	(0,5-0,3)-(1,5-0,3)	14,0-21,9	n. d.	(A Shahsavari y col., 2015)
		(0,5-0,1)-(0,5-0,3)	13,9-14,0		
	40	(0,5-0,3)-(1,5-0,3)	14,9-23,9		
		(0,5-0,1)-(0,5-0,3)	14,8-14,9		
	50	(0,5-0,3)-(1,5-0,3)	15,4-25,1		
		(0,5-0,1)-(0,5-0,3)	15,2-15,4		
Fe ₃ O ₄ -CNT	30	(0,10-0,05)-(0,10-0,15)	14,0	40,1-44,4	(Amin Shahsavari y col., 2016)
		(0,90-0,45)-(0,90-1,35)	40,6-47,6	171,5-189,6	
	40	(0,10-0,05)-(0,10-0,15)	15,0	43,2-48,4	
		(0,90-0,45)-(0,90-1,35)	44,8-53,2	165,6-191,6	
	50	(0,10-0,05)-(0,10-0,15)	15,5	104,2-112,5	
		(0,90-0,45)-(0,90-1,35)	49,0-56,0	300,0-358,3	
Fe ₃ O ₄ -CNT	20	0,1-0,3	11,9-13,9	15,2-27,8	(Sundar y col., 2014)
	40	0,1-0,3	14,1-21,3	13,0-40,7	
MWCNT- γ Al ₂ O ₃	25	0,1	20,7	n. d.	(Abbasi y col., 2013)
Grafeno-Al ₂ O ₃	30	0,1	10,0	19,0	(Ahammed y col., 2016)
	40	0,1	12,0	19,0	
	50	0,1	15,0	19,0	
CNT-Al ₂ O ₃	27	0,001-0,01	1,5-12,0	n. d.	(Hemmat Esfe, Saedodin, y col., 2015)
	47	0,001-0,01	2,0-10,0		
Al ₂ O ₃ -CNT*	25	2-4 (95:5)	3,2-5,2	n. d.	(Nine y col., 2012)
GnP-Pt *	20	0,02-0,1	1,7-15,3	n. d.	(Yarmand y col., 2016)
	30	0,02-0,1	1,6-17,2	n. d.	
	40	0,02-0,1	4,0-17,5	n. d.	

Tabla A.IV. Nanofluidos híbridos a partir de materiales carbonosos siendo el agua el fluido base (Continuación).

Nanofluido	T (°C)	% vol	% Mejora k	Referencia
GnP-Ag *	20	0,02-0,1	2,0-17,0	(Yarmand y col., 2015)
	30	0,02-0,1	2,0-18,0	
	40	0,02-0,1	5,0-23,0	
TiO ₂ -rGO	30	0,015-0,078	1,0-8,0	(Wang y col., 2016)
	40	0,015-0,078	0,5-10,0	
	50	0,015-0,078	5,0-18,0	
MWCNT-SiO ₂	27	0,1-1	9,0-12,3	(Baghbanzadeh y col., 2012)
	40	0,1-1	10,0-17,0	
MWCNT-Ag*	20	(0,05-1)-(0,05-3)	2,1-4,0	(Munkhbayar y col., 2013)
	30	(0,05-1)-(0,05-3)	4,0-7,0	
	40	(0,05-1)-(0,05-3)	5,5-14,5	
MWCNT-Ag*	20	1-4 Ag	10,6-11,3	(Farbod y Ahangarpour, 2016)
	30	1-4 Ag	10,3-13,2	
	40	1-4 Ag	12,8-20,4	
	50	1-4 Ag	12,6-20,0	

* La concentración en estos casos está dada en % en peso.

Tabla A.V. Nanofluidos convencionales siendo el etilenglicol el fluido base

Nanofluido	T (°C)	% vol	% mejora k	Referencia
Al ₂ O ₃	23	5	13	(Timofeeva y col., 2007)
Al ₂ O ₃	20	1-3	3-10	(Kim y col., 2007)
Al ₂ O ₃	ambiente	1-5	3-18	(S. Lee y col., 1999)
Al ₂ O ₃	30	0,01-0,08	3-21	(Kumar y col., 2018)
ZnO	20	1-3	3-10	(Kim y col., 2007)
TiO ₂	20	1-3	3,6-12,3	(Kim y col., 2007)
TiO ₂	30	0,01-0,06	0,7-13,8	(Kumar y Sonawane, 2016)
SiO ₂	30	0,5-2,0	2,5-6,0	(Akilu y col., 2017)
SiO ₂	20	0,5-1,0	3,2-9,5	(Guo y col., 2018)
SiC	30	0,2-1,0	5,9-18,4	(X. Li y col., 2015)
CuO	10	2	15	(Agarwal y col., 2016)
	20	2	16	
	30	2	16	
	40	2	17	
	50	2	19	
	60	2	20	
	70	2	21	
CuO	ambiente	1-4	5-22	(S. Lee y col., 1999)
CuO	30	0,01-0,06	2,6-21,6	(Kumar y Sonawane, 2016)
Ag	27	1-2	6-20	(Baheta y Woldeyohannes, 2013)
Al ₂ Cu	27	1-2	30-68	(Chopkar y col., 2008)
Ag ₂ Al	27	1-2	32-78	(Chopkar y col., 2008)

Tabla A.VI. Nanofluidos híbridos siendo el etilenglicol el fluido base.

Nanofluido	T (°C)	% vol	% mejora k	Referencia
ND-Co ₃ O ₄	20	0,05-0,15	0,6-4,5	(Sundar, Irurueta, y col., 2016)
	40	0,05-0,15	2-5	
	60	0,05-0,15	4-9	
ZnO-TiO ₂	30	0,1-3,5	1-20	(Toghraie y col., 2016)
	40	0,1-3,5	1,5-24,0	
	50	0,1-3,5	2,5-32,0	

Tabla A.VII. Nanofluidos convencionales a partir de materiales carbonosos siendo el etilenglicol el fluido base.

Nanofluido	T (°C)	% vol	% mejora k	Referencia
FSWCNT	30	0,02-0,75	1-31	(Hemmat Esfe, Firouzi, y col., 2018)
	35	0,02-0,75	2-33	
	40	0,02-0,75	2-36	
	45	0,02-0,75	2-41	
	50	0,02-0,75	3-45	
GnP	30	0,1-0,5	4-21	(Selvam y col., 2016)
DWCNT	27	0,1-0,6	6-16	(Shamaeil y col., 2016)
	30	0,1-0,6	8-19	
	36	0,1-0,6	10-21	
	41	0,1-0,6	12-23	
	46	0,1-0,6	13-24	
	52	0,1-0,6	14-25	

Tabla A.VIII. Nanofluidos híbridos a partir de materiales carbonosos siendo el etilenglicol el fluido base.

Nanofluido	T (°C)	% vol	% mejora k	Referencia
DWCNT-SiO ₂	30	0,03-1,71	1,7-21,9	(Hemmat Esfe, Abbasian Arani, y col., 2018)
	35	0,03-1,71	2,3-26,3	
	40	0,03-1,71	2,8-32,3	
	45	0,03-1,71	3,6-34,1	
	50	0,03-1,71	3,7-38,0	
SWCNT-Al ₂ O ₃	30	0,04-2,50	2-25	(Esfe y col., 2017)
	40	0,04-2,50	3-34	
	50	0,04-2,50	4,5-41,2	
MgO-FMWCNT	30	0,1-0,6	6-19	(Afrand, 2017)
	40	0,1-0,6	4-17	
	50	0,1-0,6	3-15	
SWCNT-MgO	30	0,05-2,00	1-18	(Hemmat Esfe y col., 2017)
	40	0,05-2,00	3-25	
	50	0,05-2,00	3-31	
FMWCNT-Fe ₃ O ₄	30	0,25-2,30	3-22	(Sarblookzadeh Harandi y col., 2016)
	40	0,25-2,30	3-24	
	50	0,25-2,30	5-29	

7.2 ANEXO II

Tabla A.IX. Propiedades de los materiales utilizados para la elaboración de los nanofluidos

Material	c_p (J/kg/K)	ρ (kg/m ³)	k (W/m/K)	Referencia
CuO	535,6	6500	20	(Alawi y col., 2018)
TiO ₂	686,2	4250	9	(Zaman y col., 2019)
Al ₂ O ₃	765	3970	40	(Alawi y col., 2018)
SiO ₂	703	2200	1	(Alawi y col., 2018)
ZnO	495,2	5600	13	(Alawi y col., 2018)
Al ₂ Cu	643	5830	319	(Chopkar y col., 2008)
Ag ₂ Al	480,22	7560	358	(Chopkar y col., 2008)
MgO	943	3635	48	(Poling y col., 2008)
ND	516	3100	1000	(Sundar, Hortiguera, y col., 2016)
GO	710	1910	1000	(Syam Sundar y col., 2017)
G	790	2200	5000	(Ahammed y col., 2016)
CNT	711	2100	1500	(Minea, 2017)
Co ₃ O ₄	523,43	6110	18	(Singh y col., 2017)
Fe ₃ O ₄	670	5810	161	(Minea, 2017)
Ni	440	8902	91	(Syam Sundar y col., 2018)(Poling y col., 2008)
Ag	235	10490	429	(Minea, 2017)
Cu	385	8940	401	(Minea, 2017)
SiC	750	3000	120	accuratus.com/silicar.html